



L'électronique du détecteur de surface de l'observatoire Pierre AUGER Une approche orientée système

Stéphane Colonges

► To cite this version:

Stéphane Colonges. L'électronique du détecteur de surface de l'observatoire Pierre AUGER Une approche orientée système. Cosmologie et astrophysique extra-galactique [astro-ph.CO]. Migration - université en cours d'affectation, 2004. Français. NNT: . tel-00007169

HAL Id: tel-00007169

<https://theses.hal.science/tel-00007169>

Submitted on 20 Oct 2004

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET METIERS

PARIS

MEMOIRE

Présenté en vue d'obtenir

le DIPLOME D'INGENIEUR C.N.A.M.

en

AUTOMATISME INDUSTRIEL

par

Stéphane COLONGES

**L'électronique du détecteur de surface de l'observatoire
Pierre AUGER
Une approche orientée système**

Soutenu le 14 Octobre 2004

JURY

PRESIDENT : H. BOURLES

**MEMBRES : M.T. NGUYEN
P. CHANTRE
J.M. BRUNET
B. COURTY**

CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET METIERS

PARIS

MEMOIRE

**Présenté en vue d'obtenir
le DIPLOME D'INGENIEUR C.N.A.M.
en
Automatisme Industriel**

par

Stéphane COLONGES

**L'électronique du détecteur de surface de l'observatoire Pierre AUGER
Une approche orientée système**

Les travaux relatifs au présent mémoire ont été effectués au laboratoire de Physique Corpusculaire et Cosmologie du Collège de France, 11 place Marcelin Berthelot 75231 Paris cedex 05 sous la direction de Monsieur Bernard Courty, Ingénieur, responsable du développement de l'électronique de l'observatoire Pierre Auger pour le laboratoire.

*« L'être dit libre est celui qui peut réaliser ses projets »
Jean-Paul Sartre*

A Monique Colonges, ma mère

Sommaire

Remerciements	6
Avant propos	7
Contexte du mémoire	8
PARTIE I : LE PROJET DE L'OBSERVATOIRE PIERRE AUGER	10
1. Introduction	10
2. Principes de détection utilisés et présentation de l'Observatoire.....	14
2.1 Les principes de détection	14
2.2 Le choix des sites géographiques.....	16
3. Description de l'observatoire	17
PARTIE II: CONCEPTION ET FIABILISATION	20
4. Description de l'électronique des stations locales :	20
4.1 Description générale de l'électronique d'une cuve	20
4. 2 Description de la carte unifiée	27
4.2.1 Les alimentations.....	31
4.2.2 Le contrôle de l'alimentation (Le tank power system ou « TPS »).....	31
4.2.3 Le contrôle des paramètres lents ou « Slow Control »	32
4.2.4 Le marquage en temps ou « Time Tagging ».....	38
4.2.5 La configuration matérielle	40
4. 3 Moyens mis en place pour le développement de la carte unifiée	40
4.4 Intégration de l'électronique	41
4.4.1 L'électronique du réseau prototype	41
4.4.2 L'électronique définitive	41
5. Evaluation de la fiabilité de l'électronique de AUGER.....	44
5.1. Introduction.....	44
5.2. Analyse des modes de défaillance	45
5. 3. Calcul du MTTF pour la carte unifiée	51
5.3.1. Introduction.....	51
5.3.2. Procédure générale de détermination du taux de défaillance d'une carte.....	51
5.3.3. Paramètres considérés	52
5.3.4. Effet des éléments soudés.....	53
5.3.5. Taux de défaillance du circuit imprimé.....	54
5.3.6. Taux de défaillance des circuits intégrés	54
5.3.7. Taux de défaillance des condensateurs.....	55
5.3.8. Autres taux de défaillance.....	56
5.3.9. Evaluation rapide et approximative de quelques taux de défaillance	56
5.3.10. La Règle d'Arrhenius.....	57
5.4. Evaluation statistique des défaillances au cours du temps.....	58
5.4.1. Introduction.....	58
5.4.2. Courbe caractéristique des probabilités de défaillance	58
5.4.3. Distribution exponentielle.....	59
5.4.4. Loi de Weibull	60
5.4.5. Conclusion sur le choix de la méthode d'évaluation statistique	61
5.5. Intervalles de confiance	62
5.6. Optimisation de l'estimation de fiabilité	64
5.7. Evaluation du taux de défaillance et de la quantité d'éléments de rechange	64
5.7.1 Définition du pourcentage d'éléments remplaçables.....	65
5.7.2 Taux de défaillance globale et quantité de cartes de rechange nécessaires.....	66
5.8. Stratégies de maintenance.....	68
5.9. Pour une meilleure fiabilité	68
5.10. Retour d'expérience	70

5.11. Conclusion sur la fiabilité	73
PARTIE III: PRODUCTION ET TEST DES CARTES UNIFIEES.....	74
6. Conduite de projet, qualité, suivi de production.....	74
6.1. Introduction.....	74
6.2. Les principales phases du projet	75
6.2.1. <i>Le cahier des charges et la phase de conception.....</i>	<i>75</i>
6.2.2. <i>L'industrialisation.....</i>	<i>76</i>
6.2.3. <i>La planification des tâches</i>	<i>77</i>
6.3. Plan de gestion de la qualité	78
6.4. Le marché public	80
6.4.1 <i>Les étapes de l'appel d'offre restreint.....</i>	<i>81</i>
6.4.2 <i>Les documents contractuels</i>	<i>82</i>
6.4.3 <i>Compte rendu de l'appel d'offre.....</i>	<i>84</i>
6.5. Fabrication et gestion de production	84
6.5.1. <i>Le site de production</i>	<i>84</i>
6.5.2. <i>Le dossier de fabrication</i>	<i>86</i>
6.5.3. <i>La fabrication.....</i>	<i>89</i>
6.5.4. <i>L'analyse des résultats de la production.....</i>	<i>91</i>
6.5.5. <i>Le management de la fabrication au cours du temps</i>	<i>92</i>
6.6. Conclusion.....	92
7. Le banc de test fonctionnel.....	93
8. La procédure de déverminage	96
8.1 Introduction.....	96
8.2 Le banc de déverminage	96
8.2.1. <i>La connexion des cartes.....</i>	<i>97</i>
8.2.2. <i>Le boîtier électronique de contrôle du déverminage ou « Powerbox ».....</i>	<i>97</i>
8.2.3. <i>Le programme de contrôle du déverminage.....</i>	<i>101</i>
8.3 La procédure de déverminage et sa calibration	102
8.3.1. <i>Analyse de la réponse en température de l'enceinte thermique</i>	<i>104</i>
8.3.2. <i>Calibration de la procédure de déverminage.....</i>	<i>106</i>
8.3.3. <i>Identification des cycles.....</i>	<i>108</i>
PARTIE IV : CALIBRATION, ACQUISITION ET INTEGRATION	110
9. Le trigger, la calibration du détecteur, et le software.....	110
9.1 Introduction.....	110
9.2 Le logiciel de contrôle des stations locales et d'acquisition.....	111
9.3 La sélection des signaux.....	112
9.4 La calibration.....	117
9.5 Analyse des signaux et détection de problèmes.....	119
10. Intégration sur le site d'expérience.....	120
CONCLUSION ET PERSPECTIVES	127
ANNEXES	131
Annexes I : Calendrier de déroulement du mémoire	132
Annexes II : Extrait du RDF 2000 et tableau de calcul de la fiabilité.....	133
Annexes III : Extraits de programmes et fichiers de test	142
Annexes IV : Principe de détection d'un évènement de haute énergie	146
Annexes V : Coût des cartes unifiées.....	147
Liste des Abréviations et des notations	148
Bibliographie	150

Remerciements

Je remercie Monsieur Henri BOURLES pour l'honneur qu'il me fait de présider le jury ainsi que Monsieur Pierre CHANTRE d'avoir accepté d'être membre du jury.

Je remercie Monsieur Minh Tri NGUYEN pour le temps qu'il a bien voulu me consacrer et pour son aide dans la réalisation de ce mémoire.

Je tiens à remercier aussi, Madame Annie THIEULON, pour son support administratif et son très bon accueil.

J'adresse ma reconnaissance et mes remerciements à notre directeur, Monsieur Daniel VIGNAUD, ainsi qu'au CNRS pour m'avoir permis de réaliser ce mémoire et offert des conditions favorables au suivi d'études au CNAM en favorisant la formation des personnels.

Je remercie vivement Monsieur Bernard COURTY, qui a accepté d'être mon tuteur durant ce mémoire au laboratoire de Physique Corpusculaire et Cosmologie.

Pour sa gentillesse extraordinaire, son écoute, sa disponibilité et les conseils qu'il m'a donné, je tiens à adresser de très sincères remerciements à Monsieur Jean-Michel BRUNET, physicien responsable du groupe Auger.

Je tiens à remercier Monsieur Laurent GUGLIELMI, informaticien, pour le temps qu'il m'a consacré à l'explication du logiciel d'acquisition.

J'adresse de plus, mes plus sincères remerciements à Monsieur Jean-Jacques JAEGER, responsable de notre service électronique, pour l'intérêt qu'il a porté au bon déroulement de ce mémoire.

Je remercie aussi tous les gens du laboratoire et collègues, qui de près ou de loin m'ont soutenu durant la réalisation de ce travail. Les études au CNAM et la réalisation d'un mémoire laissent peu de loisirs à consacrer à sa famille et ses amis. Je tiens à les remercier de leur compréhension. Particulièrement, je remercie ma compagne, Laetitia, pour sa compréhension et son soutien.

Avant propos

Une collaboration internationale a été mise en place entre 18 pays comprenant environ 60 instituts et trois cents physiciens et ingénieurs, pour la construction de l'observatoire Pierre Auger, en cours d'installation à Malargüe, Argentine, au pied de la cordillère des Andes. L'objectif de l'expérience est l'observation des rayonnements cosmiques de haute énergie ($> 10^{19}$ eV), qui sont probablement la manifestation des phénomènes les plus violents existants dans l'univers. Il s'agit de l'exploration d'un domaine de l'astrophysique et de la cosmologie dont la compréhension échappe en partie à la communauté scientifique depuis plus de trente-cinq ans. L'observatoire Pierre Auger s'étendra sur 3000 km^2 (50 kilomètres sur 60), soit typiquement la taille de l'île de France, ce sera le plus grand détecteur de rayons cosmiques au monde. Cet observatoire présente la particularité de réunir deux types de détection, qui sont celle de la fluorescence générée par un rayon cosmique en pénétrant dans l'atmosphère, et le comptage par 1600 détecteurs de surface des particules au niveau du sol provenant de la gerbe atmosphérique générée par ce rayon cosmique. Le système électronique dont nous partageons la charge, recueille et traite ces signaux engendrés dans chaque détecteur de surface et les envoie à un central d'acquisition par liaison radio. Cette partie numérique du système d'acquisition qui regroupe plusieurs fonctions distinctes est communément appelée « carte unifiée » ou « Unified Board » (UB).

Ce mémoire porte sur l'étude, la conception et la fabrication de la carte unifiée, qui est l'élément principal et l'intelligence des détecteurs de surface. En raison des conditions environnementales difficiles et de la grande surface du champ d'expérience une attention particulière est portée à la fiabilisation de notre système. Cette préoccupation constitue un sujet important de cette étude. Après la présentation du fonctionnement de l'observatoire et des différentes parties de l'électronique des détecteurs de surface, une importante étude concernant la fiabilisation de ce produit est menée dans le chapitre 5. La conduite du projet, la qualité et le suivi de production ont aussi une part fondamentale dans la mise au point du détecteur et sa fiabilisation et font l'objet d'un sixième chapitre. Les bancs de test et de déverminage sont essentiels à la fiabilisation du produit. Le travail présenté en chapitre 7 et 8 a porté sur le développement de ces moyens de test et de déverminage. Un neuvième chapitre est consacré à la sélection des événements et à la calibration des détecteurs, et constitue une approche intéressante pour l'étude de ce système de détection et l'analyse de ses performances. Un dernier chapitre s'intéresse à l'intégration des cartes sur le site d'expérience et la mise au point des détecteurs. On trouvera enfin en conclusion une réflexion sur les développements futurs de l'observatoire.

Contexte du mémoire

Ce mémoire est réalisé au sein du groupe AUGER du Laboratoire de Physique Corpusculaire et Cosmologie (LPCC) qui est une Unité Mixte de Recherche du Centre National de la Recherche Scientifique (UMR 7553) et qui fait parti de l'Institut National de Physique des Particules et de Physique Nucléaire (IN2P3) qui est un des deux grands instituts du CNRS et regroupe 23 laboratoires répartis dans plusieurs villes de la France métropolitaine. Les activités de recherche de l'IN2P3 se répartissent en deux grands domaines qui sont la physique des particules (avec sa composante astrophysique) et la physique nucléaire. C'est-à-dire de l'infiniment petit à l'infiniment grand. Ces recherches donnent lieu à de nombreuses applications dans les domaines de l'énergie nucléaire et du médical (imagerie, proton thérapie...).

Le LPCC est hébergé au sein du Collège de France à Paris, établissement fondé en 1531 par François 1^{er}. Sa vocation est d'enseigner la recherche en cours. Situé au cœur du quartier latin à Paris, il abrite 52 chaires couvrant presque toutes les disciplines de la recherche (De la sociologie à la physique en passant par la biologie). On compte parmi l'assemblée de ses Professeurs titulaires de chaires plusieurs prix Nobel. De nombreux savants célèbres ont contribué à son histoire (Claude Bernard, André Marie Ampère à l'origine de la chaire de physique, Frédéric Joliot Curie...). La chaire de Physique Corpusculaire et Cosmologie est attribuée à Monsieur le Professeur Marcel Froissart.

A la fin de l'année 2005, les personnels du LPCC rejoindront le nouveau laboratoire Astroparticules et Cosmologie qui sera installé sur le nouveau site de Tolbiac (Université Paris 7, INSU, IN2P3, CEA...).

Le laboratoire PCC compte actuellement environ 90 personnes (Chercheurs, Ingénieurs, Techniciens, Administratifs et doctorants compris). Son premier pôle de recherche est la cosmologie observationnelle (Observation de supernovae à partir des télescopes du Pic du Midi en France et du télescope Isaac Newton aux Canaries, étude du fond cosmologique primordial à l'aide de l'expérience de ballon stratosphérique ARCHEOPS et du futur satellite « Planck »). Le second est l'étude des rayons cosmiques de très haute énergie au-delà de l'EeV soit 10^{18} eV (Expériences AUGER et EUSO). Le troisième est l'astronomie gamma à haute énergie (Expériences CAT et CELESTE sur le site de Thémis dans les Pyrénées, et le

télescope HESS installé en Namibie depuis l'été 2001). Le quatrième est l'étude des neutrinos solaires de basse énergie (Expériences BOREXINO et LENS).

Les groupes de physique sont soutenus par des groupes techniques assurant les développements instrumentaux.

Le service électronique dont je fais partie, intervient dans diverses expériences du laboratoire et participe à de nombreuses réalisations (électronique analogique, digitale, conception d'ASIC, programmation, simulation, conception assistée par ordinateur...).

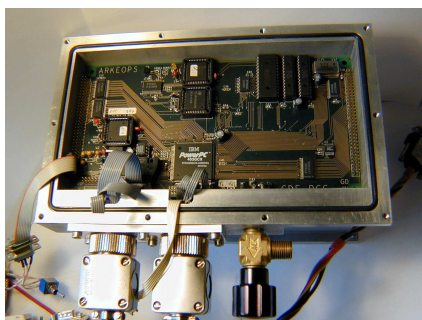


Photo 1 : Enregistreur de vol de « Archéops » réalisé par le service électronique

PARTIE I : LE PROJET DE L'OBSERVATOIRE PIERRE AUGER

1. Introduction

L'observatoire Pierre Auger est un projet de détecteur de rayons cosmiques destiné à explorer un domaine de l'astrophysique dont la compréhension échappe à la communauté scientifique depuis plus de trente-cinq ans. L'objectif de l'expérience est l'observation des rayonnements cosmiques de haute énergie ($> 10^{19}$ **électrons Volts ou eV***), qui sont probablement la manifestation des phénomènes les plus violents existants dans l'univers. Il s'agit là d'une énergie exceptionnelle, 100 millions de fois plus élevée que celle atteinte auprès des accélérateurs les plus puissants construits ou même envisagés dans le futur. Cette énergie de plusieurs dizaines de joules (celle d'une balle de tennis servie par un champion ou un tir de penalty avec un ballon de football) est une énergie macroscopique, exceptionnelle pour une particule microscopique. Mais, pour une particule de cette énergie, l'univers est relativement opaque à cause du rayonnement fossile (à 2,7°K) qui le baigne et qui est « une relique du big bang ». En effet, au dessus de 5×10^{19} eV, la perte d'énergie par collisions entre les rayons cosmiques et les photons de ce rayonnement devient très importante et les particules ne peuvent parcourir que des distances relativement faibles (à l'échelle cosmologique s'entend), de l'ordre de quelques dizaines de mégaparsecs (*1 parsec = 3 années-lumière*) qui est typiquement la taille du superamas local auquel appartient notre galaxie. Cette coupure en énergie au delà de laquelle tout rayon cosmique d'énergie supérieure à 5×10^{19} eV devrait être arrêté en interagissant avec le fond diffus cosmologique est appelée coupure GZK (des initiales de leurs inventeurs : Greisen, Zatsepin et Kuzmin). Donc, en théorie, des rayons cosmiques de très haute énergie ne devraient pas arriver dans l'atmosphère terrestre, ou du moins on devrait observer ces sources qui devraient être proches. Hors ces trente dernières années plusieurs événements de très hautes énergies ont été observés. On est donc devant un problème extrêmement rare en physique : une observation expérimentale irréfutable qui résiste à l'interprétation théorique pendant plus d'un tiers de siècle. On sait que les sources de ces rayons cosmiques existent, et qu'elles sont proches de nous, mais on n'a aucune idée de ce qu'elles peuvent être ni où elles se trouvent exactement. C'est à ces phénomènes, les plus violents existant dans l'univers, que le projet de détecteur "Observatoire Pierre Auger" se propose d'apporter des réponses.

La réalisation de cet observatoire, initiée par deux physiciens, Alan Watson et Jim Cronin (Prix Nobel de physique en 1980) mobilise une collaboration de près d'une vingtaine de pays et environ trois cents physiciens et ingénieurs ; C'est la première collaboration de dimension réellement mondiale dans ce domaine. Le projet porte le nom de Pierre Auger en hommage à ce physicien français mondialement connu pour ses activités dans les domaines de la physique nucléaire et celui des rayons cosmiques (Il a mis en évidence l'existence des gerbes atmosphériques en détectant des coïncidences c'est-à-dire des particules arrivant en même temps dans plusieurs détecteurs espacés les uns des autres).

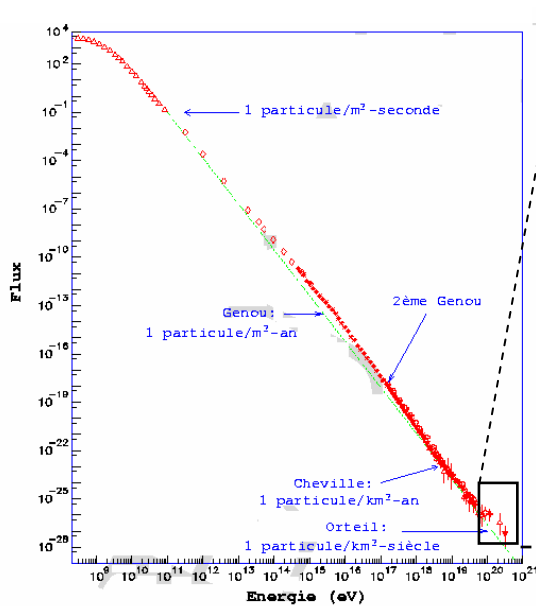


Figure 1 : Flux des rayons cosmiques

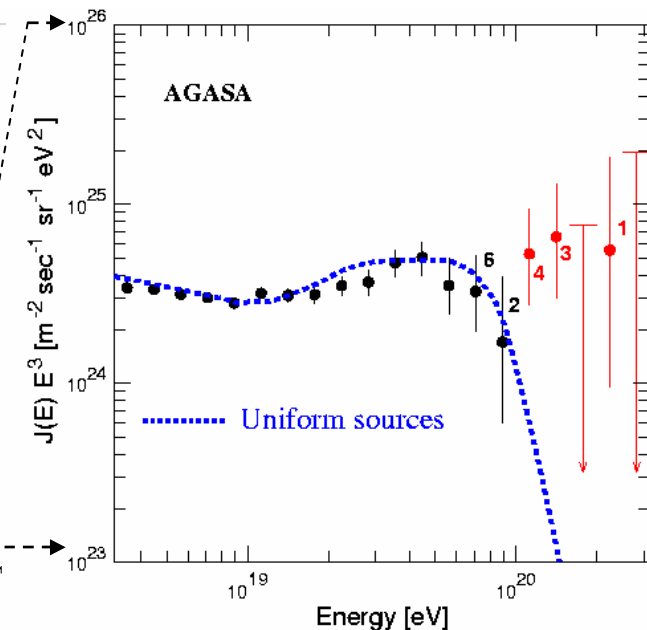


Figure 2 : Coupure « GZK »

La figure 2 représente le bout du spectre de la figure 1

La courbe verte est une linéarisation de la courbe rouge basée sur des mesures réelles

3 points caractéristiques (2 genoux et 1 cheville) marquent les fléchissements de la courbe

1 particule / mètre carré / seconde : origine solaire

1 particule / mètre carré / an : origine galactique (1^{er} genou)

1 particule / Km carré / an : origine inconnue ou extragalactique (Cheville)

Nature et détection des rayons cosmiques :

Les rayons cosmiques sont simplement des particules ordinaires (noyaux atomiques, photons, neutrinos) produites par des mécanismes astrophysiques plus ou moins violents, qui peuvent aller des réactions de fusion au coeur des étoiles à des phénomènes exceptionnels provoqués par des trous noirs se trouvant au centre de certaines galaxies (noyaux actifs) en passant par des supernovae (effondrement d'étoiles à bout de "carburant"), des collisions de galaxies, etc. Ces particules transportent avec elles des informations (leur énergie, direction, composition chimique...) qui permettent de remonter aux mécanismes qui sont à leur origine et qui sont le seul moyen dont nous disposons pour comprendre ces derniers. En effet, contrairement à la plupart des autres domaines de la recherche fondamentale, l'astrophysique a la particularité d'échapper complètement au contrôle de l'expérimentateur qui ne peut provoquer les phénomènes qu'il veut étudier et qui ne lui sont donc accessibles qu'indirectement. Les seuls "messagers" qui nous permettent d'étudier les phénomènes astrophysiques à distance sont les ondes émises par les objets de l'étude (étoiles, galaxies...) et les rayons cosmiques.

Lorsque le flux des particules est important (donc pour de faibles énergie $< 10^{15}$ eV), il est possible de détecter directement les particules à l'aide d'expériences embarquées sur des satellites terrestres.

Au-delà, les flux de particules étant très faibles, on observe l'effet produit par les rayons cosmiques en pénétrant dans l'atmosphère. De nombreuses théories ont été développées afin de déterminer l'origine de ces phénomènes d'extrême violence. Certaines théories si elles étaient vérifiées verraient l'avènement d'une nouvelle physique.

Les théories sur l'origine des RCUHE (Rayons Cosmiques d'Ultra Haute Energie) peuvent être vues sous forme de deux méthodes distinctes. Une première concerne les phénomènes dits Bottom up, mécanisme dans lequel on prend les particules connues et on les accélère. Les accélérateurs étant des sources astrophysiques, sièges de phénomènes extrêmement violents (radio galaxies, pulsars, supernovae, collision d'objets massifs, trous noirs associés à des phénomènes d'accélération des particules engendrés en particulier par le milieu interstellaire associé aux irrégularités magnétiques aussi appelés mécanisme de Fermi, agissant comme des « raquettes » pour accélérer les particules...). Si les RCUHE se révèlent issus d'un tel mécanisme, nous devrions observer des rayons cosmiques provenant de sources ponctuelles (observation d'anisotropies) de notre univers. De plus, les objets en mesure de générer des rayons cosmiques de cette énergie, doivent être suffisamment proches en raison de GZK.

Nous devrions donc pouvoir les observer. Or, jusqu'à présent, nous n'avons observé aucun « candidat » sérieux ! La seconde méthode consiste à désintégrer des particules de masse extrême, les rayons d'ultra haute énergie n'étant plus que les produits de la désintégration. Ces mécanismes sont appelés top down et font appel à de la physique nouvelle pour expliquer ces particules super massives. On pourrait imaginer ces défauts, comme des défauts spatio-temporels, qui auraient emprisonné des particules super massives (qui pourraient être issues d'évènements ultra violents comme le big bang par exemple) et qui tout d'un coup se briseraient en libérant une énergie phénoménale issue d'un autre temps. Une provenance uniforme de ces évènements depuis toutes les directions de l'univers tendrait à confirmer cette théorie. La détermination de la nature du rayon cosmique primaire, permettra de discriminer entre les deux méthodes.

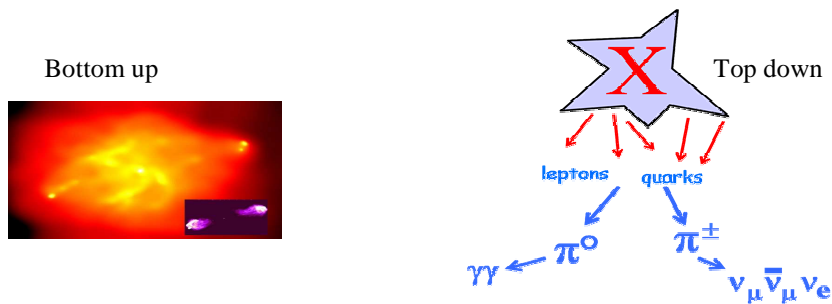


Figure 3 : phénomène « Bottom up » et phénomène « Top down »

2. Principes de détection utilisés et présentation de l'Observatoire

2.1 Les principes de détection

En raison du très faible nombre de RCUHE de l'ordre de quelques-uns par kilomètres carrés et par siècle, et afin d'obtenir la meilleure statistique possible, il a été choisi de réaliser un détecteur de très grande surface dans l'hémisphère Sud, qui jusqu'à présent ne disposait d'aucun détecteur. C'est la commune de Malargüe au pied de la Cordillère des Andes (20000 habitants) dans la province de Mendoza en Argentine qui accueille ce site. En fonction des premiers résultats obtenus un second détecteur d'égale surface doit être construit dans l'hémisphère Nord. Un détecteur placé dans l'hémisphère sud permet en particulier d'observer en direction du centre galactique alors qu'un détecteur placé dans l'hémisphère nord permet une observation vers l'extérieur de la galaxie.

Pour des énergies élevées, les particules en pénétrant dans les hautes couches de l'atmosphère (plusieurs dizaines de kilomètres) créent des gerbes électromagnétiques dont l'impact au niveau du sol comporte environ 100 milliards de particules (photons et électrons essentiellement) réparties sur une dizaine de km². Au cours de ce processus, ces particules secondaires chargées qui ont été créées tout au long du développement de la gerbe provoquent dans l'atmosphère un phénomène lumineux dû à l'excitation des atomes d'azote de l'atmosphère qui se désexcitent en émettant une lumière de fluorescence dans toutes les directions.

L'observatoire Pierre Auger a pour originalité d'être un détecteur hybride qui utilise deux des propriétés de la gerbe pour en analyser les caractéristiques et remonter au rayon cosmique initial. Il comporte un réseau géant de détecteurs qui ont pour but de compter les particules qui les frappent au niveau du sol et des détecteurs de fluorescence (appelé aussi Fly Eyes detector : détecteur œil de mouche) qui observent le profil longitudinal de la gerbe en captant la lumière de fluorescence émise par le passage des particules chargées dans l'atmosphère. Ces deux techniques sont redondantes et complémentaires à la fois (d'où l'appellation "hybride"). Elles permettent (par des méthodes d'analyse compliquées) de reconstruire la direction du rayon cosmique incident, de mesurer son énergie et, jusqu'à un certain point, d'identifier sa nature. L'objectif de l'utilisation des deux méthodes (détection de surface et de fluorescence qui ont déjà été employées chacune indépendamment dans le passé sur des

expériences de moindre échelle) est aussi de pouvoir réaliser une inter calibration entre les détecteurs en enregistrant des coïncidences afin d'améliorer encore la fiabilité de la mesure.

L'observatoire Pierre Auger s'étendra sur 3000 km^2 (50 kilomètres sur 60), soit typiquement la taille de l'île de France, ce sera **le plus grand détecteur de rayons cosmiques au monde** ! Ses premiers éléments ont été installés au cours de l'année 2000. A la fin de l'année 2003, il était déjà le plus grand observatoire de rayons cosmiques au monde. Sa construction devrait s'étendre jusqu'à la fin de l'année 2005 et il doit fonctionner pendant 20 ans.

Le coût du projet est relativement modeste, il a été fixé à 50 Millions de Dollars pour le site sud (A titre de comparaison, le coût du lancement d'un satellite est proche de 100 Millions de Dollars).

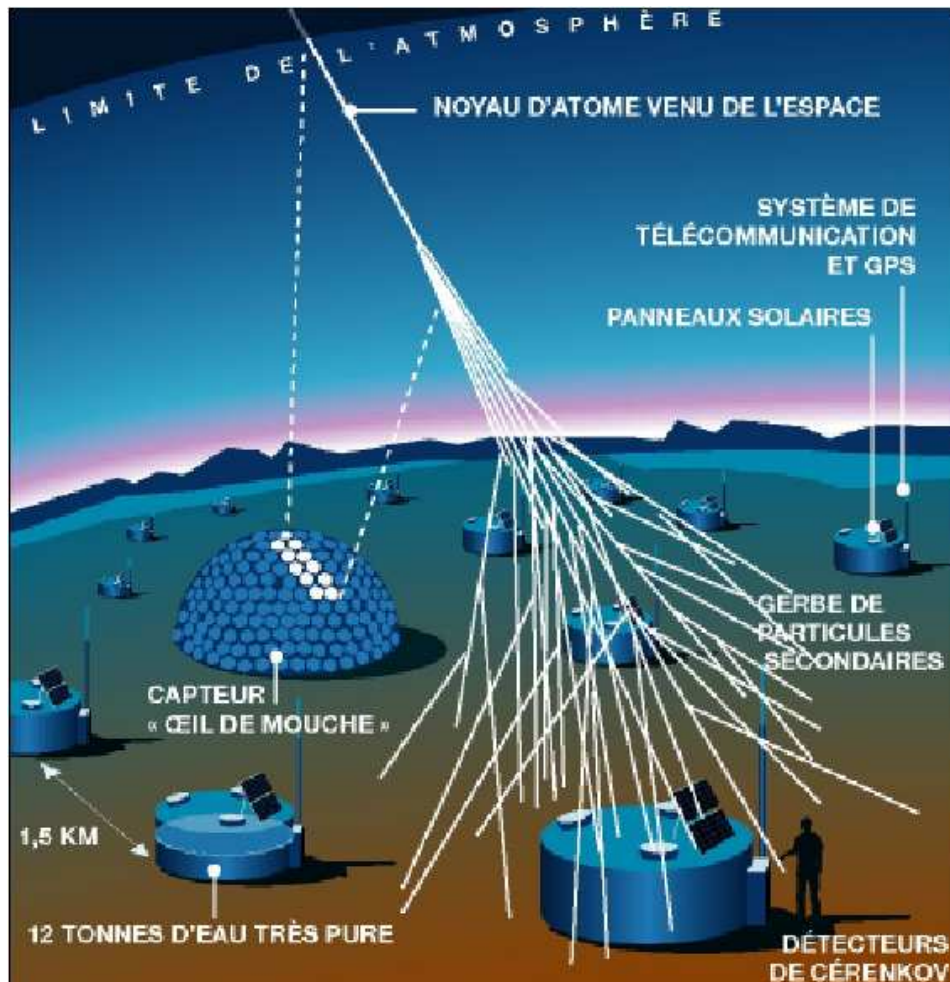


Figure 4 : Vue d'artiste de l'observatoire Pierre Auger
(Représentation d'une détection hybride)

2.2 Le choix des sites géographiques

Outre les considérations politiques et économiques le choix des sites est dicté par :

- La nécessité d'absence de pollution lumineuse la nuit, d'une atmosphère claire et d'un temps souvent clément pour la détection de la fluorescence de la gerbe avec le détecteur dit « Fly's Eyes »
- L'utilisation de l'énergie solaire pour alimenter les détecteurs qui impose le choix de régions avec un ensoleillement annuel maximum
- La nécessité d'être situé aux environs de 1400 mètres d'altitude pour laquelle le développement de la gerbe atmosphérique est le meilleur
- L'inclinaison de la Terre par rapport à son orbite qui impose d'installer les sites au voisinage de 35 degrés de latitudes nord et sud pour que la quasi-totalité du ciel soit visible
- Le besoin d'un terrain plat pour faciliter la communication des données depuis les détecteurs par liaison radio

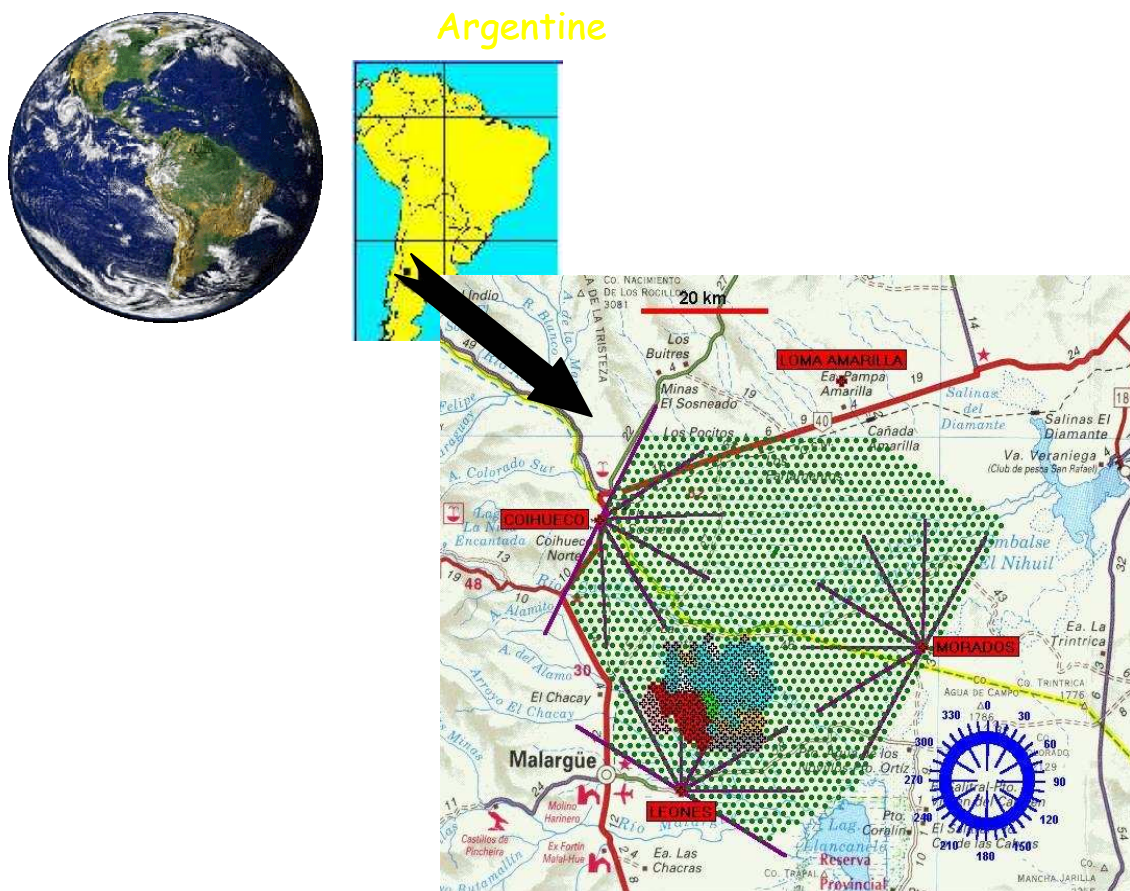


Figure 5 : Situation géographique du site sud de l'observatoire Pierre Auger

(Dimensions maximales du site : 55 kilomètres sur 70 kilomètres)

3. Description de l'observatoire

Cet observatoire s'appuie fortement sur le concept d'intelligence distribuée, thème porteur dans les travaux de recherche et développement de nouveaux détecteurs en physique. Il est constitué de :

- Un central d'acquisition de données et de supervision de l'ensemble de l'observatoire (**CDAS : Central Data Acquisition System**). Il est situé à l'entrée de la ville de Malargüe.
- 1600 détecteurs de surface (S.D., appelés aussi cuves ou tanks) autonomes, communiquant avec le CDAS par un système de télécommunication à plusieurs étages (radio). Ces stations de détection sont espacées de 1,5 kilomètres les unes par rapport aux autres. Ce sont des cuves remplies de 12 m³ d'eau très pure. A leur arrivée au sol, les particules de la gerbe électromagnétique, en traversant les cuves produisent dans l'eau un effet « Tcherenkov ». C'est à dire qu'il y a une génération de photons, émis sur un cône dont l'axe est la direction de la particule qui en est à l'origine. En effet, toute particule dont la vitesse est supérieure à la celle de la lumière dans l'eau, génère un cône de lumière ultraviolette vers l'avant (longueur d'onde d'environ 400 nanomètres). Cette lumière est mesurée à l'aide de 3 photomultiplicateurs. Un système électronique recueille et traite ces signaux engendrés dans la cuve, et les envoie à un central d'acquisition par liaison radio. Afin de connaître la direction des rayons cosmiques, on mesure avec précision le temps d'arrivée des événements sur chaque cuve au moyen d'un système GPS (Ground Positioning System). La différence d'arrivée en temps des événements entre chaque cuve permet de déterminer la direction de provenance des particules. Ce détecteur a l'avantage de pouvoir fonctionner 100% du temps.
- 4 sites équipés de détecteurs de fluorescence repartis aux 4 côtés de l'observatoire (Cohueco, Los Morados, Los Leones, Loma Amarilla ou Norte). Ces détecteurs sont sensibles aux longueurs d'ondes ultraviolettes. Ils regardent en direction de l'horizon du champ d'expérience afin d'observer le développement longitudinal de la gerbe. L'observation ne pouvant être réalisée que la nuit, par temps clair et sans lune, ces détecteurs fonctionnent seulement moins de 10% du temps environ.
- 5 concentrateurs micro-ondes pour la retransmission des communications radio entre les détecteurs et le CDAS (dont 4 situés sur les sites de fluorescence permettant l'échange des données avec le concentrateur du central d'acquisition).



Photo 2 : détecteur de surface

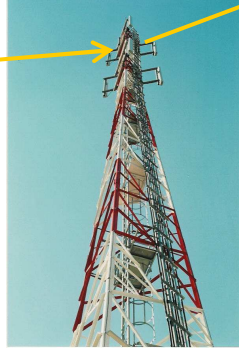


Photo 3 : Concentrateur



Photo 4 : CDAS

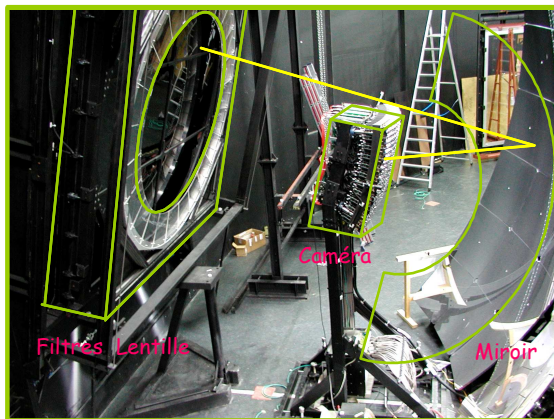


Photo 5 : Vue d'un télescope de fluorescence



Photo 6 : Observatoire de fluorescence

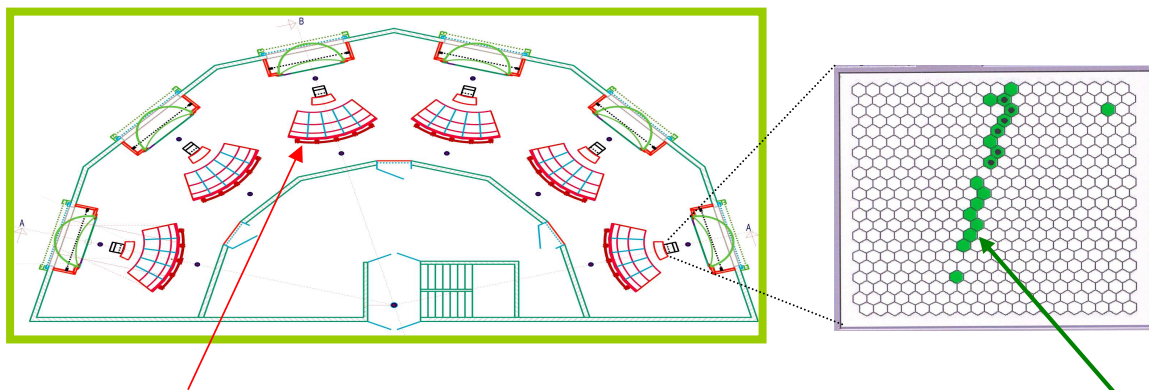
Lorsqu'un évènement intéressant est signalé par plusieurs cuves, il est recueilli, traité et stocké par le CDAS. Les données sont ensuite envoyées via le réseau Internet (liaison satellite) vers divers centres de calcul dans le monde (Lyon en France, La Plata en Argentine et Chicago aux USA) et sont mises à disposition des physiciens pour l'analyse.

Caractéristiques principales des cuves :

- 3 mètres 60 de diamètre et 1 mètre 50 de hauteur totale
- 1 mètre 20 de hauteur d'eau
- Les 12 mètres cubes d'eau sont contenus dans une poche imperméable appelée « liner » placée à l'intérieur de la cuve. Ce « liner » est équipé de 3 hublots sur sa partie supérieure distants de 120 degrés sur lesquels sont collés chaque photomultiplicateur observant ainsi l'intérieur de la cuve. Un autre petit hublot permet l'installation d'un « flasheur » à 2 diodes électroluminescentes (cf. 4.1.5). La surface interne du « liner » permet la réflexion des photons qui ont été générés dans l'eau par effet Tcherenkov et leur permet ainsi d'atteindre les photomultiplicateurs. L'ensemble est entièrement opaque à la lumière externe

- Matière plastique (Polyéthylène : choix réalisé a cause de l'environnement salin – forte résistance mécanique). Ces cuves sont de couleur jaune pour se fondre dans l'environnement, elles seront retirées dans 20 ans
- Une électronique intelligente intégrée permet à l'aide des 3 photomultiplicateurs la détection des particules des gerbes électromagnétiques traversant la cuve. Dans la première phase du projet, une électronique modulaire a été développée pour l'étude du réseau prototype (Engineering Array – 35 détecteurs installés au cours de l'année 2001). Elle est remplacée, dans la forme définitive de l'observatoire (réseau de production) par une électronique intégrée, sur laquelle s'appuie cette étude conçue à partir de l'expérience acquise sur le réseau prototype

Caractéristiques principales de chaque observatoire de fluorescence :



Il y a 6 télescopes dans chaque observatoire de fluorescence.

*La caméra située à la focale de chaque miroir est constituée de 440 photomultiplicateurs
(En vert la trace laissée par une gerbe atmosphérique sur une caméra d'un télescope)*

Figure 6 : description d'un observatoire de fluorescence

PARTIE II: CONCEPTION ET FIABILISATION

4. Description de l'électronique des stations locales :

Notre laboratoire a une responsabilité importante dans la construction de ce détecteur, et plus particulièrement, nous sommes en charge de l'électronique et du logiciel de la partie « contrôleur de station locale » (que nous appelons aussi «*carte unifiée*»). La contribution du travail présenté dans ce document est en complet rapport avec cette partie centrale.

4.1 Description générale de l'électronique d'une cuve

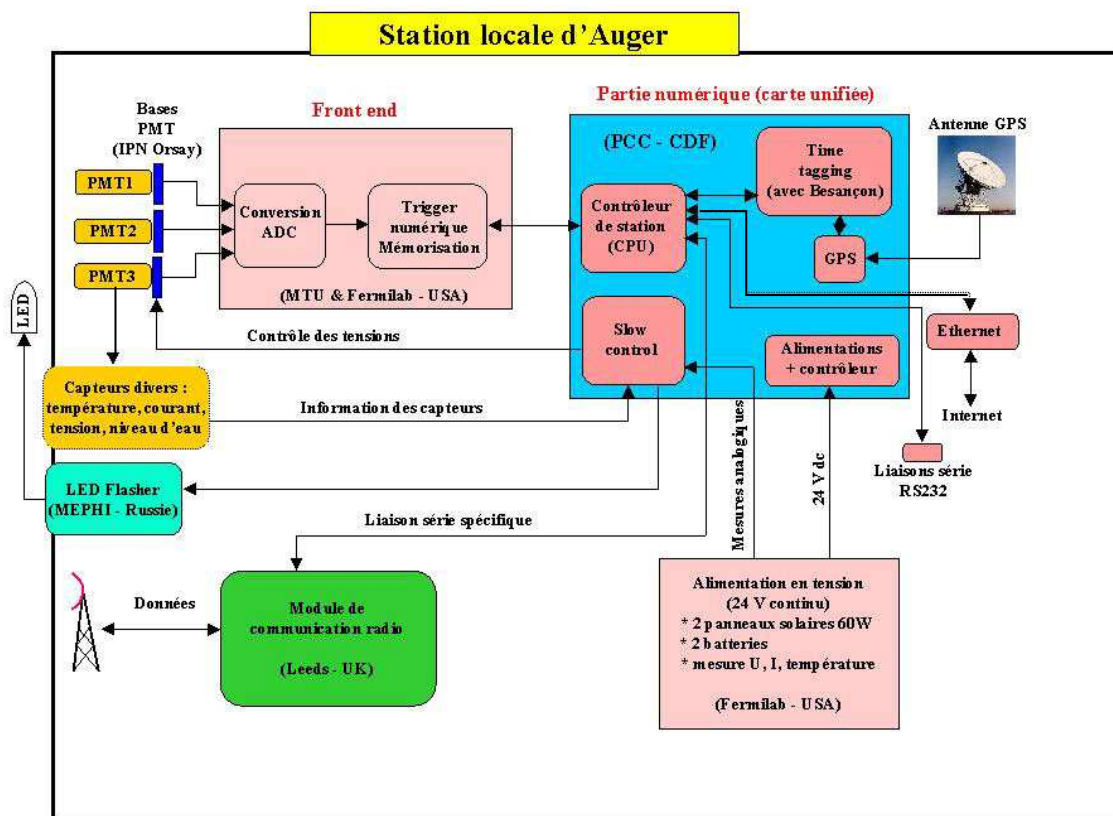


Figure 7 : Schéma fonctionnel d'une station locale

Chaque station locale est équipée de :

- 3 photomultiplicateurs permettant la conversion des photons détectés dans la cuve en signal électrique (Institut de Physique Nucléaire d'Orsay – Photonis France)

- 1 embase sur chacun des photomultiplicateurs (sous la responsabilité de l'IPN à Orsay) pour la collection et l'amplification des signaux issus des photomultiplicateurs
- 1 Front End (Michigan Technology University et Fermilab aux Etats Unis) pour la numérisation et la sélection des signaux issus des embases
- La partie numérique qui constitue le cœur du système (Carte Unifiée - LPCC Paris)
- Le micro-TPCB (Tank Power Control Board) pour le contrôle des batteries et des panneaux solaires (Fermilab – Etats Unis)
- Le Led Flasher (Mephi – Russie) pour la calibration du détecteur
- Le module de communication radio (Leeds – UK)

4.1.1 Caractéristiques des photomultiplicateurs et des embases

Les tubes photomultiplicateurs (PMT) sont très utilisés en physique des particules. Ils le sont aussi particulièrement dans le domaine de l'imagerie médicale.

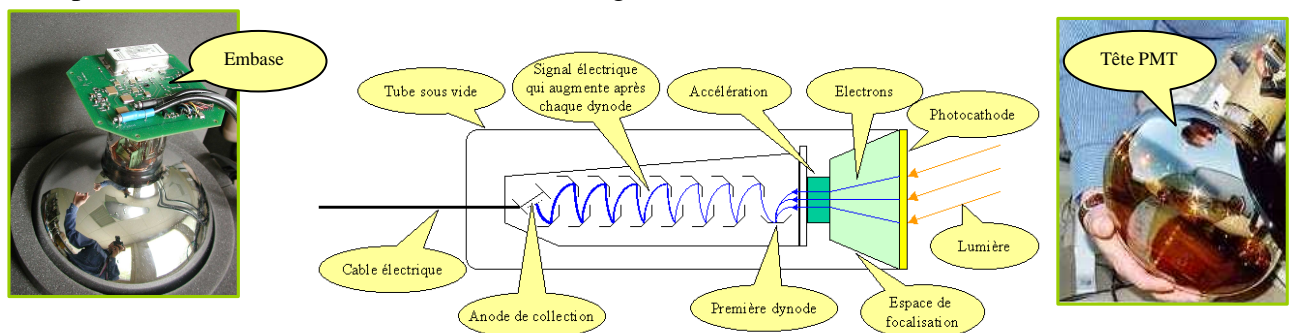


Figure 8 : représentation d'un photomultiplicateur

Un photomultiplicateur est constitué d'une photocathode qui convertit les photons (lumière Tcherenkov) en signal électrique qui est amplifié par une succession de dynodes.

Les caractéristiques majeures des photomultiplicateurs sont :

- Leur longueur d'onde : entre 430 et 480 nanomètres.
- Sur chaque tube photomultiplicateur une embase électronique permet de polariser tous les éléments de ce tube et d'en extraire les signaux. L'alimentation est réalisée sur chaque embase à l'aide d'un module haute tension (2 kilovolts) de très haut rendement et de faible puissance et contrôlé par la partie dite "slow control" de l'électronique unifiée présentée par la suite. Les éléments sont polarisés à l'aide d'une chaîne de résistances. Ces embases sont coulées dans de la résine pour une protection optimale contre l'humidité présente dans la cuve.

- Le signal est recueilli sur la dernière dynode (sa sortie est appelée haut gain) et sur l'anode (sortie bas gain). Le rapport d'amplification dynode / anode est égal à 32. Ainsi pour un évènement de très faible amplitude (nombre de photons très réduits) une meilleure résolution est obtenue sur la dernière dynode ; En revanche lorsqu'un très grand nombre de photon est observé, le canal de haut gain (dynode) se trouve alors saturé, et une meilleure observation du signal est alors réalisée sur l'anode.
- Grande dynamique : $2 \cdot 10^5$ en amplitude.
- Ces photomultiplicateurs ainsi que les embases, ont été développés spécifiquement pour le projet Auger par l'IPN d'Orsay en collaboration avec la société Photonis (Brive la Gaillarde – France).

4.1.2 L'acquisition du signal ou « Front End »

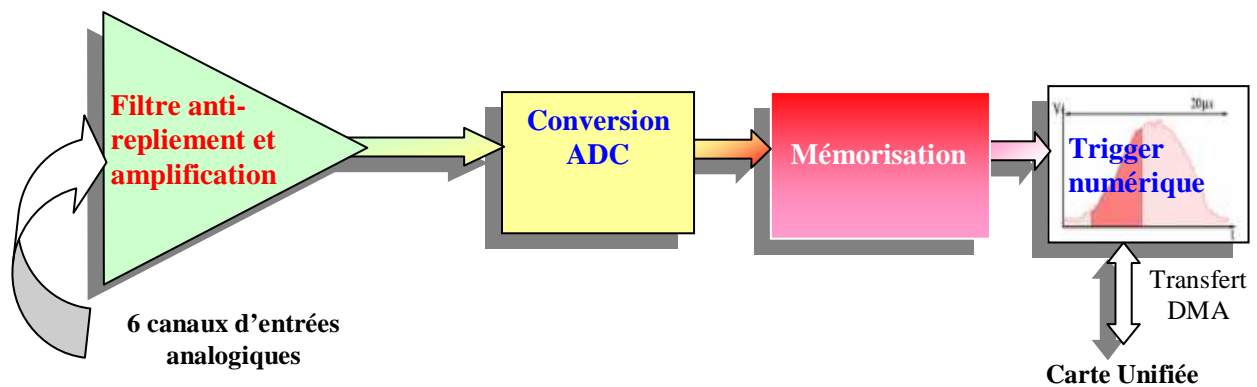


Figure 9 : principe du Front End

La carte « Front End » permet l'acquisition des signaux des photomultiplicateurs, leur numérisation et leur sélection.

Les signaux des six canaux d'entrées analogiques (gamme de 0 à 2 Volts) constitués par trois anodes et trois dynodes sont mis en forme à l'aide d'amplificateurs et de filtres anti-repliement de type Bessel du troisième ordre dont la fréquence de coupure à -3 dB est de 20 MHz. Une protection contre les surtensions est implémentée sur chaque entrée. La conversion du signal est réalisée à l'aide de six convertisseurs (1 par voie) analogiques – numériques (CAN) de 10 bits de résolution chacun qui échantillonnent les signaux à une fréquence de 40 MHz. Le signal de dynode sur anode pour chaque photomultiplicateur est acquis en utilisant 2 voies du CAN avec un recouvrement relatif de 5 bits. L'amplitude réelle de mesure de ce signal est donc de 15 bits.

Les données sont stockées pour chaque anode et dynode dans des mémoires de type “FIFO” :

- Six voies au total (trois anodes et trois dynodes)
- Deux mémoires FIFO de 1024 octets par voie permettent d’avoir un temps mort très réduit

La sélection des signaux est réalisée par plusieurs fonctions de déclenchement (« triggers numériques ») en amplitude et en temps. Lorsqu’un signal est sélectionné, une demande d’interruption est transmise au processeur de la carte unifiée qui autorise alors le transfert des données vers les mémoires dynamiques (DRAM EDO) de la carte unifiée (Transfert rapide par accès direct en mémoire “DMA”). Les niveaux de déclenchement sont réglés par des registres dans le composant logique programmable (Field Programmable Gate Array) du Front End dont le contenu est écrit par le processeur de la carte unifiée. Le “trigger numérique” est implémenté dans deux composants logiques programmables (FPGA) de type ACEX de la marque Altera. Les algorithmes de sélection des signaux (Triggers) sont présentés en chapitre 9. Le Front End est une carte indépendante connectée à la carte unifiée à l’aide d’un connecteur DIN 96 broches de classe II pour la transmission des signaux logiques et d’un connecteur de type Dubox 10 broches pour les alimentations. J’ai réalisé le choix de cette connectique entre l’électronique unifiée et cette carte, en prenant en compte les conditions environnementales et d’intégrité du signal.

4.1.3 La partie contrôleur de station (partie numérique dite « Carte Unifiée »)

C’est un système intelligent permettant le contrôle de l’ensemble de la station locale. Le système d’exploitation et les programmes d’acquisition installés et spécifiquement développés, réalisent le contrôle de l’ensemble de la station locale. Ce contrôleur est constitué de 4 grandes fonctions :

- Les alimentations
- L’ensemble processeur
- La datation des événements (Time Tagging)
- Le contrôle des paramètres lents (slow control)

Constituant le cœur de cette étude, un chapitre spécifique est consacré à la description de ce système et la justification des solutions choisies. La conception de cette carte s’est étalée durant les années 2001 et 2002 sous la responsabilité de notre laboratoire. J’ai participé à la

conception de plusieurs fonctions (Slow Control, TPS, alimentations), au choix des composants et à la définition des différents tests de qualification.

4.1.4 Alimentation générale en tension des détecteurs de surface

L'installation de lignes électriques dans la pampa Argentine pour l'alimentation des détecteurs est une solution qui n'a pas été retenue en raison de son coût beaucoup trop important, du risque de pollution lumineuse par branchements sauvages et des difficultés de maintenance. Il a été choisi d'utiliser des panneaux solaires couplés à des batteries pour permettre le fonctionnement permanent de l'électronique des détecteurs. Cette source d'énergie écologique impose une faible consommation de chaque cuve dont la puissance consommée a été limitée dans le cahier des charges à 10 Watts. Cette limitation devrait permettre un fonctionnement sans interruption même durant les conditions météorologiques les plus défavorables, c'est à dire les jours d'hiver par mauvais temps, où les réserves d'énergie descendent rapidement. L'alimentation de chaque détecteur est constituée de :

- 2 panneaux solaires de 60 Watts, fournissant 48 Volts
- 1 régulateur : régule la tension délivrée par les panneaux solaires et recharge les batteries
- 2 batteries de 12 Volts branchées en série (24 Volts aux bornes des deux)
- Carte micro-TPCB : mesure les tensions, courants et températures des batteries et panneaux solaires et distribue ces mesures analogiques sur les entrées du Slow Control du contrôleur de station

4.1.5 Le générateur d'impulsions lumineuses ou « LED Flasher »

Le « LED Flasher » permet de générer des impulsions lumineuses (10^8 photons par impulsion) à l'aide de 2 diodes électroluminescentes émettant alternativement dans une longueur d'onde proche de l'ultraviolet (465 nanomètres avec une largeur spectrale inférieure à 30 nanomètres).

Il est composé de deux parties : Le contrôleur et l'émetteur.

La partie émettrice est composée de 2 diodes électroluminescentes avec leur électronique associée de génération d'impulsions : Les 2 diodes sont dirigées vers le fond de la cuve en

émettant des impulsions au travers d'un hublot spécifique placé sur la partie supérieure du « liner » et décalé du centre (proche du photomultiplicateur 1).

La partie contrôleur permet de commander l'amplitude et le déclenchement des impulsions générées dans la cuve.

Le Led Flasher est utilisé pour :

- Calibrer et mesurer la linéarité des photomultiplicateurs
- Le test fonctionnel rapide des photomultiplicateurs durant l'assemblage des détecteurs (réalisé dans un hall d'assemblage. Les « liners » à l'intérieur des cuves sont remplis d'air à cet effet)
- Le test des photomultiplicateurs dans les champs lors de l'installation d'un détecteur (cuve) qui est rempli d'eau purifiée après avoir été positionné dans la Pampa

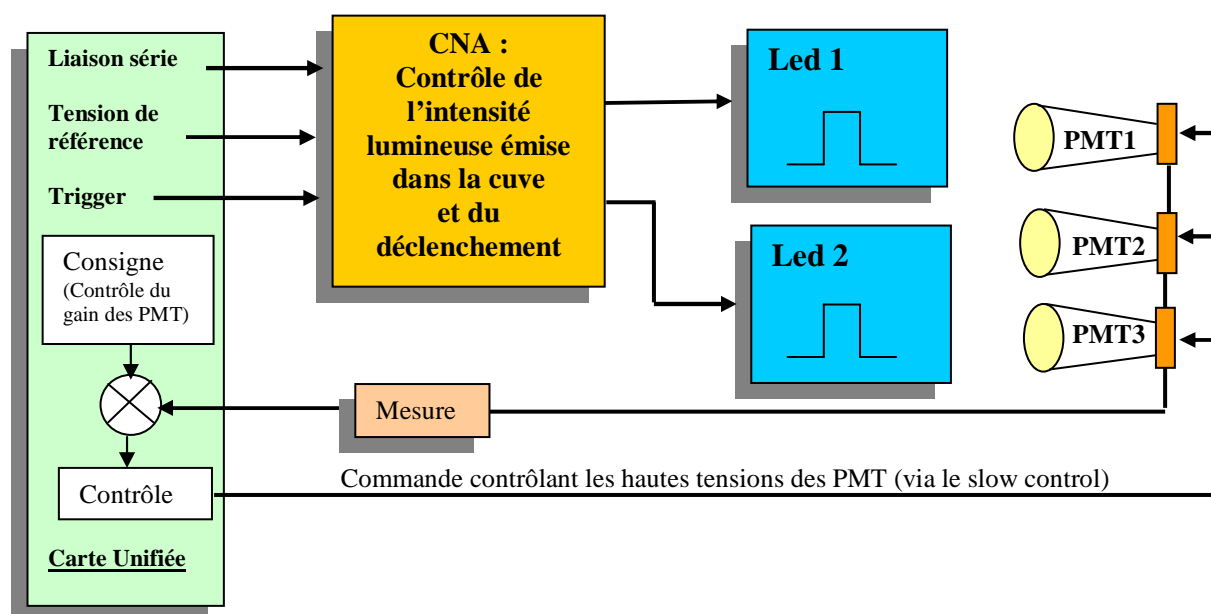


Figure 10 : Principe de fonctionnement du « Led Flasheur »

En changeant la tension appliquée sur les photomultiplicateurs on agit sur leur gain, ce qui permet donc de vérifier la linéarité complète des photomultiplicateurs pour différents gains.

Le contrôleur de Led Flasher est une carte fille connectée à la carte unifiée par un connecteur de 14 broches (Dubox).

4.1.6 Le module de communication

Le module de communication (dit « Subscriber Unit » ou « SU »), est monté dans un boîtier métallique. Il permet la transmission des données entre le détecteur et le CDAS. Il est relié à la carte unifiée avec une liaison série de type RS232 modifiée incluant les signaux de communication, l'alimentation en 12 Volts continu du module, les signaux de réinitialisation de la carte unifiée par ce module radio et inversement, ainsi qu'un signal de synchronisation GPS pour que toutes les radios du site soient synchronisées. Les caractéristiques principales du système de communication sont :

- Bandes de 902 à 928 MHz
- Espacement entre les canaux de 500 kHz
- Consommation moyenne de 0,95W sur 12 Volts
- Le réseau de communication est découpé en zones selon le même principe que les systèmes de téléphonie mobile
- Un élément appelé Base Station Unit (BSU) permet de communiquer avec 80 stations locales
- Taux de transmission de données de 200 Kbps maximum
- Les BSU sont reliées via un élément dit « BSX » (lien E1 débit 2Mbps) à un lien micro-onde (bande : 7 GHz – 0,5 W – 34 Mbps maximum de communication de données) pour la communication vers le central. Notons, que d'un point de vue matériel, une BSU est simplement une Subscriber Unit (SU) modifiée avec un programme différent
- Chaque seconde est divisée pour que toutes les stations puissent émettre chacune à tour de rôle (Technologie de transmission dite **TDMA : Time Division Multiple Access**)
- La synchronisation des stations est réalisée en utilisant le signal du module GPS
- Etant donné que 80 stations partagent la même bande (200 Kbps /80), le débit d'émission et de réception par détecteur est relativement modeste. Il est de 1200 bits utiles / seconde en émission et de 2400 / bits / seconde en réception (Remarque : le CDAS peut envoyer des messages ou des requêtes à une ou à plusieurs stations en même temps)

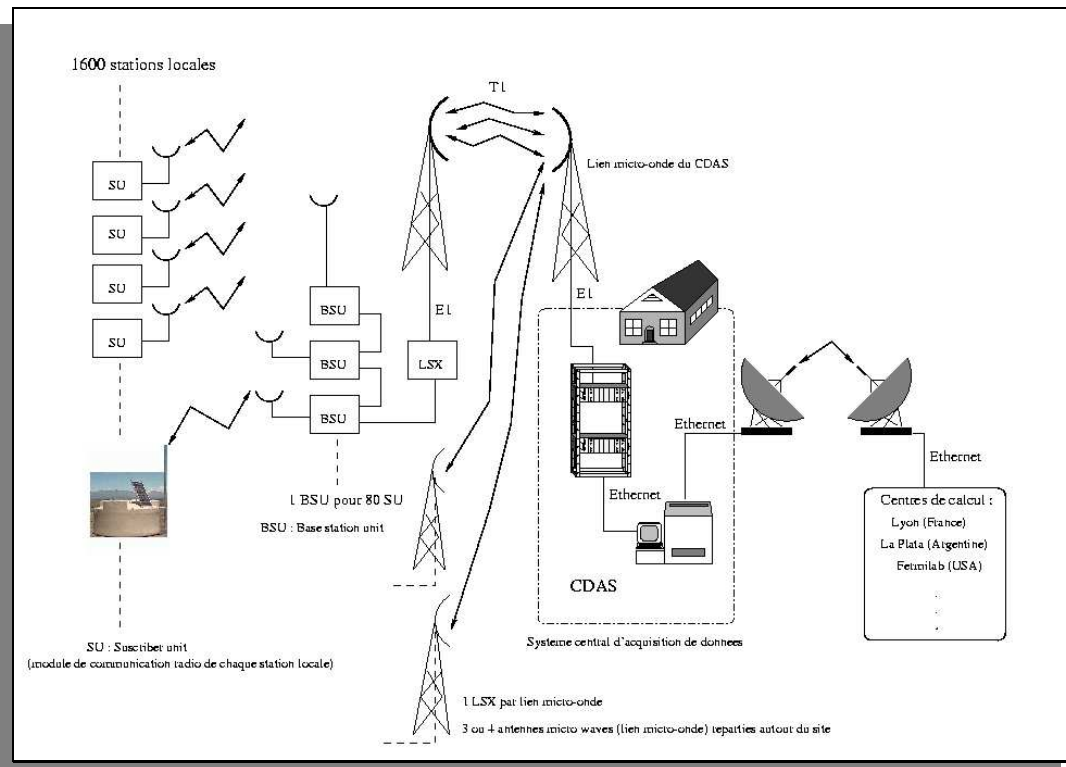


Figure 11 : la communication des données de l'observatoire Pierre Auger

4. 2 Description de la carte unifiée

Caractéristiques fondamentales imposées par le cahier des charges :

- **Température de fonctionnement** : -20 à +70 degrés Celsius
- **Température de stockage** : -40 à +80 degrés Celsius
- **La durée de l'expérience doit être de 20 ans**
- **Cycle de fonctionnement** 7 jours sur 7, 24 heures sur 24, pendant 20 ans
- **Consommation** maximale de 10 Watts pour l'ensemble de l'électronique de la cuve
- **Hygrométrie moyenne** de 30 à 80% ; 70% du terrain inondable ; Environnement salin
- **Caractéristiques du circuit imprimé** :
 - Ø **Dimensions** : 240*340 mm. en verre époxy (FR-4)
 - Ø 4 couches métallisées dont 2 couches d'alimentation internes et 2 couches signaux externes, classe V, espacement des pattes de 0,5 mm minimum, pas de boîtiers **BGA** (Ball Grid Array) pour faciliter la maintenance. Finition nickel or pour améliorer la fiabilité des soudures. Les deux couches externes sont sérigraphiées.
 - Ø Tous les composants sont montés dans le même sens et sur une seule couche à l'exception de trois connecteurs (coût de fabrication plus faible et meilleure fiabilité).

Le cœur du système :

- Le processeur : Power IBM PC 403 GCX 80 MHz en interne – 40 MHz sur le bus
- Bus : 24 bits d'adresses et 32 bits de données
- Système d'exploitation : Microware OS9000 (système temps réel ressemblant à Unix)
- 32 Méga Octets de mémoire Dynamic RAM EDO
- 8 Méga Octets de mémoire Flash EPROM (protégeable en écriture) contenant le système d'exploitation et les programmes d'acquisition, de calibration et de test
- Une mémoire de sauvegarde PROM OTP (non reprogrammable) de 128 Kilo Octets permet reprogrammer la Flash Eprom à l'aide d'une liaison Ethernet, dans le cas où le programme serait corrompu
- Flexibilité : Un composant logique programmable in situ (PLD) permet la reconfiguration du système. Il gère la plupart des signaux de contrôle de la carte (Chip Select, contrôle DMA...). Le numéro de la carte est inscrit dans un registre figé de ce PLD
- Des canaux DMA (Accès direct en mémoire) sont utilisés pour le transfert rapide des données du Front End
- Périphérique de 4 ports série RS232 plus le port série du Power PC utilisés pour communiquer avec les éléments externes (GPS, radio, console externe, test et un port supplémentaire disponible sur un connecteur HE10 de la carte situé derrière les connecteurs SUBD9)
- Connecteur permettant le branchement d'une carte Ethernet externe (développée par notre laboratoire et utilisée pour les tests de la carte et le développement des programmes)



Photo 7 : La carte Ethernet développée par notre laboratoire

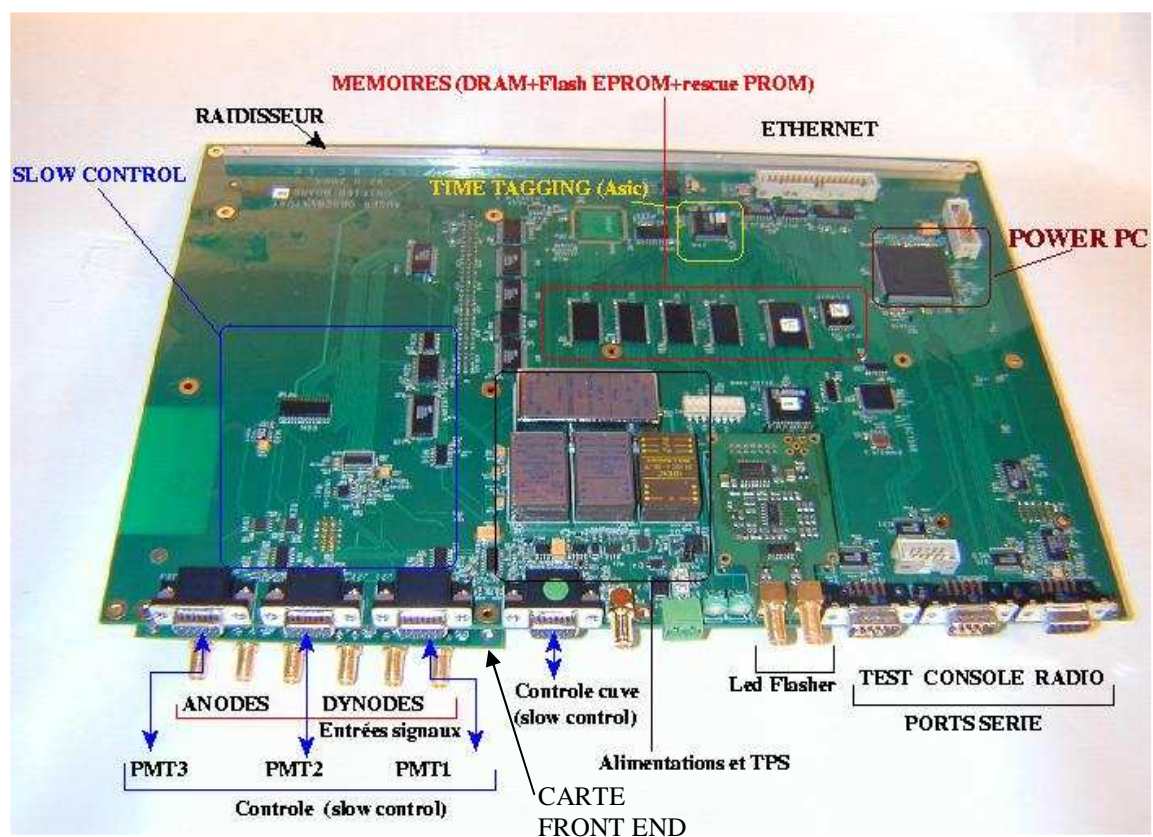


Photo 8 : la carte unifiée vue de dessus

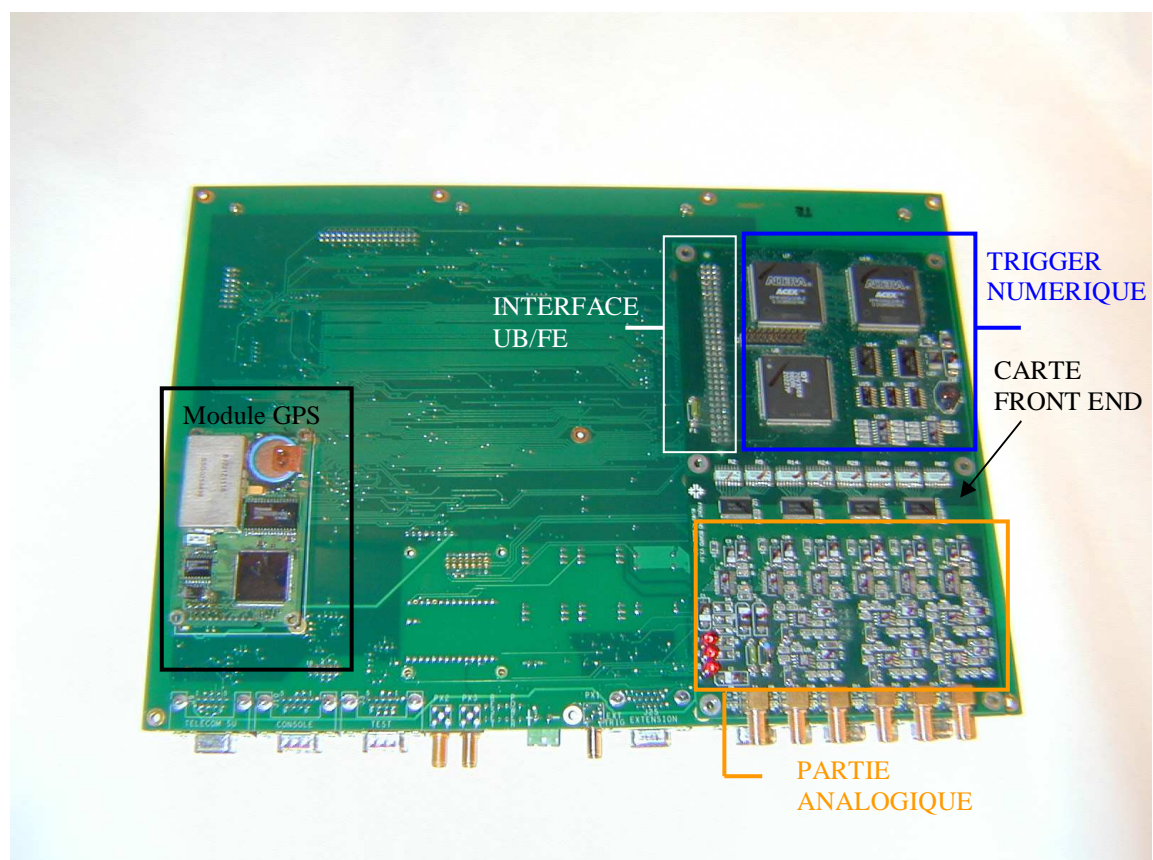


Photo 9 : la carte unifiée vue de dessous

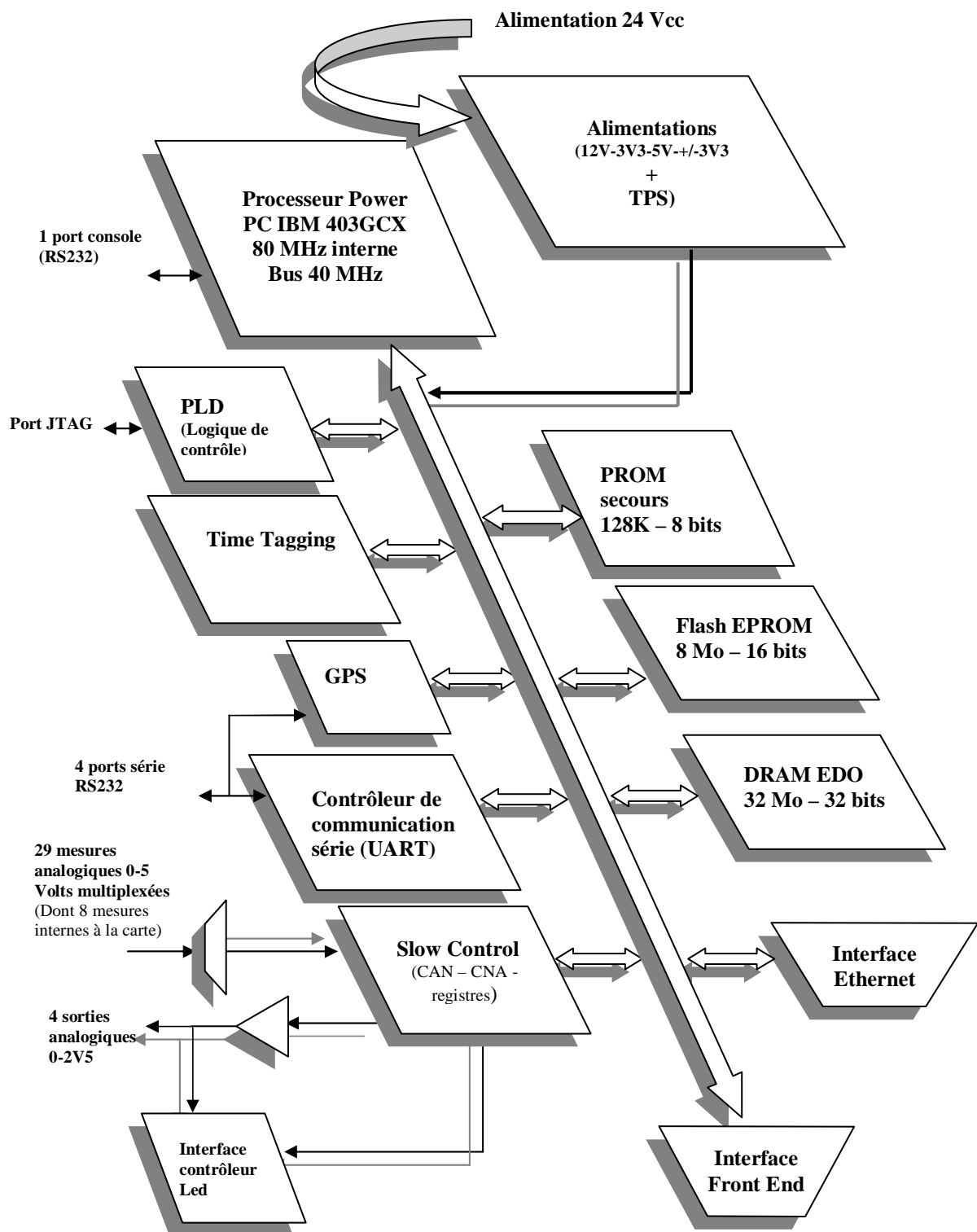


Figure 12 : schéma fonctionnel de la carte unifiée

4.2.1 Les alimentations

La carte est alimentée en 24 Volts continu (batteries). Les 5 tensions d'alimentation requises par l'électronique sont générées par des convertisseurs de tension à découpage DC-DC.

Pour le test de la version prototype, la solution développée rapidement à partir de divers composants était génératrice de bruit et non fiable. Le temps de développement d'une solution satisfaisante étant non négligeable, nous avons choisi de rechercher des produits commerciaux présentant d'excellentes caractéristiques. Ces produits largement distribués (ferroviaire, aéronautique, environnements sévères...) s'appuient sur des données de fiabilité validées par les nombreux retours d'expérience. Le besoin d'un très haut rendement afin de consommer le moins possible, la nécessité d'une excellente fiabilité (20 ans de fonctionnement), la large gamme d'entrée (18 à 36 Volts continu), le très faible bruit et le très faible rayonnement électromagnétique sont les caractéristiques essentielles requises. Après avoir testé différents produits, mon choix s'est porté sur des convertisseurs DC/DC de chez Ibek. Le rendement de ces produits est supérieur à 80 pour cents avec des niveaux de bruit crête à crête inférieurs à 20 millivolts, sauf pour les alimentations des parties digitales où ce bruit est compris dans une gamme inférieure à 100 mV. Un module 12 volts de 6 watts permet l'alimentation des bases des PMT (qui requièrent un très faible bruit), et celle du module radio. Un module de 5 volts, 3 watts non isolé permet l'alimentation du slow control, de l'interface Ethernet et du module GPS. Un module de 3.3 Volts, 7 watts permet l'alimentation des parties numériques. Enfin, un module de + et - 3.3 Volts, isolé, 3 Watts permet l'alimentation de la partie analogique du Front End et du Led Flasher en conservant la possibilité de séparer la masse de cette alimentation de celle des autres. La fiabilité évaluée pour ces modules est comprise entre 1 million et demi d'heures pour le module 3.3 Volts de 7 Watts à 4 millions d'heures pour les autres modules. Ces produits sont conformes aux normes sur les rayonnements électromagnétiques. Leur génération de bruit est très faible et ils sont garantis 2 ans.

4.2.2 Le contrôle de l'alimentation (Le tank power system ou « TPS »)

Cette fonction permet la mise hors tension de la carte unifiée en cas de tension trop faible (Afin de protéger l'électronique et surtout les batteries en leur permettant de se recharger). Ce système avertit le processeur de la coupure imminente. Si la situation n'est pas redevenue normale dans la minute suivant le déclenchement de l'alarme, ce système met la carte hors tension durant environ 3 heures 30, durée au-delà de laquelle, la remise sous tension est

réalisée automatiquement. Ce système doit consommer très peu, présenter une excellente fiabilité et son coût doit être faible. Le processeur power PC (PPC) peut aussi envoyer un ordre de coupure à cette fonction qui doit rester actif 1 minute pour être pris en compte. Pour la remise en service de la carte avant la fin de la coupure, une possibilité de réinitialisation manuelle anticipée est implémentée par appui sur un bouton poussoir monté sur la carte.

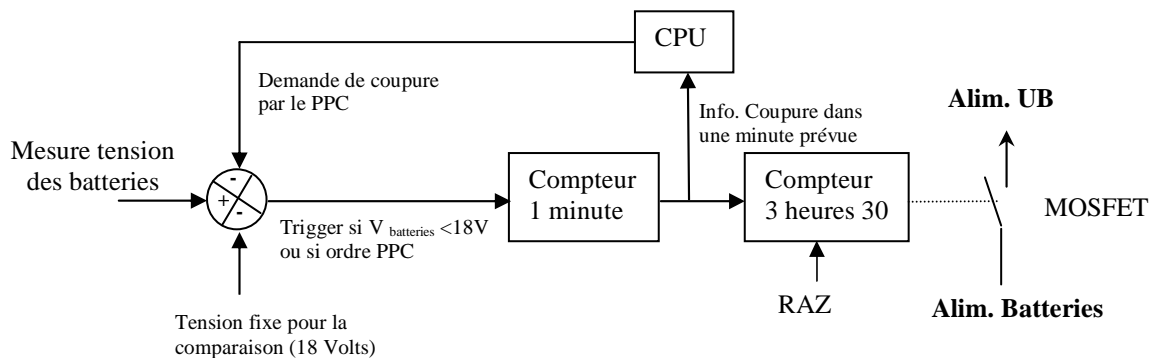


Figure 13 : principe de fonctionnement de la fonction TPS

4.2.3 Le contrôle des paramètres lents ou « *Slow Control* »

Cette fonction permet le contrôle du détecteur : commande des tensions appliquées sur les photomultiplicateurs, contrôle du Led Flasher, et mesure des paramètres à variation lente (utilisés pour calibrer le détecteur) qui sont des tensions, courants (photomultiplicateurs, alimentations...), températures.

Le « *Slow Control* » est composé de 29 entrées de mesures analogiques sur une gamme de 0 à 5 Volts, de 4 sorties analogiques sur une gamme de 0 à 2,5Volts et de plusieurs entrées et sorties numériques.

Un convertisseur analogique numérique (CAN) de 12 bits permet la numérisation des mesures analogiques. 24 voies d'entrées analogiques sont multiplexées afin d'être lues par 3 entrées du convertisseur 8 voies. Les 5 autres entrées permettent la mesure directe des tensions et de la température sur la carte. Les principales mesures analogiques sont les températures, tensions et courants pour chaque photomultiplicateur, la température de la carte unifiée, les diverses alimentations distribuées sur la carte unifiée, et les tensions, courants et températures des batteries et des panneaux solaires. Il y a enfin 2 entrées libres (pour la mesure de la température et du niveau de l'eau par exemple).

Les 4 tensions de sortie analogiques sont délivrées à l'aide d'un convertisseur numérique analogique (CNA) de 12 bits et amplifiées en sortie à l'aide d'amplificateurs opérationnels. Trois sorties commandent les tensions appliquées sur chacun des trois photomultiplicateurs et une sortie contrôle le « Led Flasher ». Enfin, les entrées et les sorties numériques permettent notamment la génération d'un déclenchement externe vers le Front End (External trigger), la lecture de la présence d'une carte Ethernet connectée par l'intermédiaire du connecteur prévu à cet effet, la génération des signaux de contrôle des multiplexeurs du Slow Control et la gestion des signaux de contrôle de la fonction "TPS".

Etude du fonctionnement et réponse temporelle :

Lors des tests du slow control, les sorties des CNA sont rebouclées sur les entrées du CAN (On doit relire une valeur très proche) à l'aide de poignées supportant des connecteurs de bouclage. Le programme d'acquisition et de test doit prendre en compte les temps de stabilisation des mesures en entrée des multiplexeurs pour l'acquisition des valeurs. Lorsque ce temps est insuffisant, la valeur lue est fausse (Les erreurs constatées peuvent parfois être supérieures à 10%). Ce temps de stabilisation est imposé par la présence de capacités sur les entrées de mesure et donc leur temps de charge.

Il convient donc de déterminer le temps optimum à attendre pour la stabilisation de chaque entrée du slow control. Le programme d'acquisition et de test utilise une librairie spécifique où sont spécifiés les temps d'attente nécessaires à la stabilisation de la mesure et l'adressage du « Slow Control ». J'ai mesuré et évalué la réponse temporelle du « Slow Control » afin de corriger cette librairie pour obtenir un fonctionnement optimum. Dans ce but, j'ai écrit un programme qui réalise les actions suivantes :

- 1) Ecriture de valeurs définies en sortie des CNA (de 0 à 4096 Hexa)
- 2) Sélection d'une voie de multiplexeur et attente de stabilisation
- 3) Attente de conversion CAN et lecture de l'entrée du CAN correspondante
- 4) Ecriture de la valeur 0 en sortie des CNA (pour décharger complètement les capacités)
- 5) Attente de stabilisation de la voie de multiplexeur sélectionnée
- 6) Attente de conversion CAN et lecture de l'entrée (décharge des capacités)
- 7) On recommence les étapes 1 et 6 jusqu'à la lecture des toutes les voies d'entrées
- 8) Le temps d'attente de stabilisation du multiplexeur est incrémenté d'une unité et on recommence les étapes de 1 à 7 autant de fois de fois que nécessaire à l'observation de la réponse temporelle du slow control

Les résultats expérimentaux peuvent être ensuite comparés à l'évaluation théorique.

Pour l'écriture de ce programme, une fonction sommeil (Ossleep) est utilisée. Un temps d'attente (Ticks) équivaut à 3.9 ms (mesure réalisée avec un petit programme de test). Cette fonction a l'avantage de ne pas bloquer les ressources CPU pendant l'attente. En revanche sa durée est imprécise, car elle peut être diminuée si la charge du processeur est faible (jusqu'à un temps d'attente de moins).

Pour le programme d'acquisition final, il est utilisé le compteur interne de 52 bits du power PC permettant d'obtenir un temps d'attente précis sans monopoliser les ressources Système

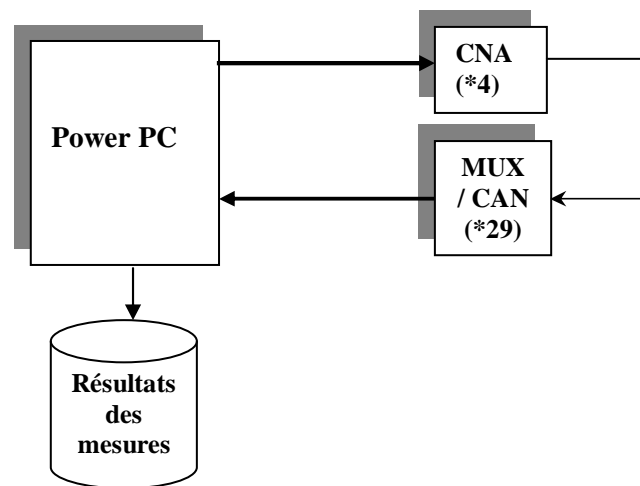


Figure 14 : mesure de la réponse temporelle du slow control

4.2.3.1. Résultats des mesures et comparaison avec le calcul théorique

Pour les voies 0 à 4, la lecture est directe sur le CAN (seulement attendre le temps de conversion du CAN c'est à dire 4 microsecondes au minimum)

Pour les autres voies (excepté 10, 14, 15), la lecture est réalisée à travers les multiplexeurs. Le temps de stabilisation de la mesure peut être évalué en considérant l'ensemble des éléments de la chaîne de bouclage. La sortie du CNA est rebouclée sur plusieurs entrées. Les éléments à prendre en compte pour le calcul de la constante de temps sont la résistance et la capacité équivalente en entrée, la résistance de sortie de l'amplificateur opérationnel chargé de l'amplification du signal de sortie du CNA (1.6 K Ω), la résistance du multiplexeur (450 Ohms) et la capacité en entrée du CAN (10nF).

Pour le connecteur dit « extension » on reboucle une sortie de CNA sur 9 entrées, ainsi la résistance équivalente en entrée est de 1 K Ω , donc une résistance équivalente de la boucle de 3.05 K Ω , et la capacité équivalente est de 1 μ F. Ainsi pour ces entrées la constante de temps ($\tau = RC$) est de 3 millisecondes. Pour les connecteurs de contrôle des photomultiplicateurs, la résistance équivalente est de 6 K Ω et la capacité équivalente est de 210 nF. La constante de temps est alors proche de 1.3 millisecondes. Lors des tests de la carte, c'est ces constantes de temps qui doivent être considérées. En utilisation normale, en l'absence de bouclage, le temps de stabilisation donc la constante de temps est bien évidemment inférieur car la résistance de la ligne est plus faible.

Pour un système du premier ordre, on exprime la réponse temporelle comme suit :

$$s(tr) = K(1 - e^{(-tr/T)})$$

Avec tr exprimant le temps pour lequel on étudie la réponse s(tr) de ce système, K la valeur finale et T la constante de temps.

On en déduit facilement que pour ce système 63% de la valeur finale est atteinte après T et 95% de la valeur finale est atteinte après 3T.

La recherche du temps de stabilisation est réalisée pour la valeur finale, ou sa valeur très proche, car la valeur finale ne peut être atteinte qu'après un temps infini. De plus, on doit considérer chaque valeur au pas de quantification du CAN près soit 1.3 mV pour 5 Volts. Pour la détermination de ce temps de stabilisation, il est choisi de considérer la valeur finale atteinte à 0.15% de la valeur finale, et on peut poser :

$$tr = - T \ln 0.0015$$

Pour les entrées du connecteur extension, on pose $tr = -3.05 \ln 0.0015$ donc le temps de stabilisation théorique est de **20 ms** environ. Pour les entrées des connecteurs des photomultiplicateurs, le temps de stabilisation calculé est proche de **8.5 ms**.

Comparaison avec les résultats expérimentaux :

En analysant les mesures, on constate la stabilisation des voies du connecteur extension après 6 temps d'attente (ticks) soit environ 23 millisecondes ce qui est très proche de l'évaluation théorique (au temps d'attente près). Pour les voies des connecteurs des photomultiplicateurs, on observe cette stabilisation après 3 temps d'attente, soit maximum 12 millisecondes.

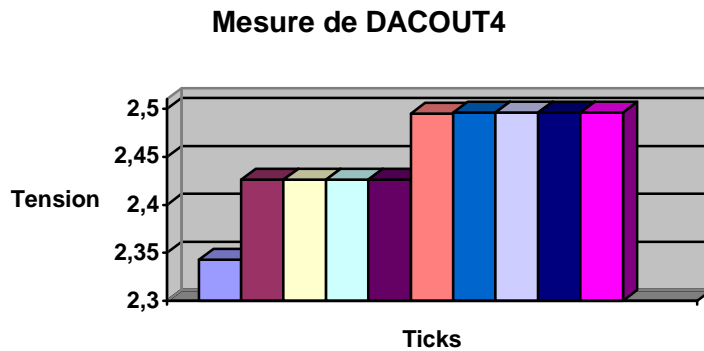


Figure 15 : Temps de stabilisation mesuré sur une entrée du multiplexeur (connecteur extension)

Pour les voies de lecture 10, 14 et 15 sur multiplexeurs (SVANAM, MSC12V et MSU12V): ces entrées sont des mesures de tensions réalisées sur la carte et utilisées durant le fonctionnement normal du détecteur pour la mesure des tensions +/-3V3 de la section analogique et la mesure du 12 Volts assurant l'alimentation de la radio et des sorties analogiques du slow control. Ces chaînes de mesure sont caractérisées par leur grande constante de temps :

- Grande résistance : 100 K Ω
- Capacité : 100 nF
- Résistance du multiplexeur (MUX) : 450 Ohms
- Capacité entrée CAN : 10 nF

Le temps de stabilisation à prendre en compte ici est le temps de charge de la capacité "C2" par "C1" puis des deux capacités lors de la fermeture du multiplexeur comme illustré sur le schéma équivalent suivant :

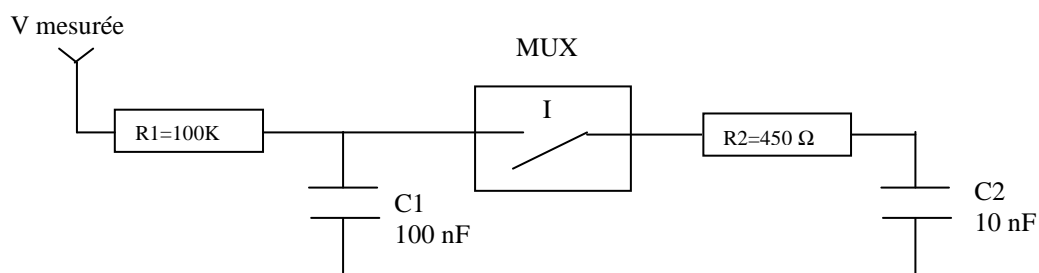


Figure 16 : schéma équivalent de la mesure des tensions sur les voies 10,14 et 15

On cherche donc la durée nécessaire pour que les charges des 2 condensateurs s'équilibrent et on détermine le niveau de charge lors de l'équilibrage. Les capacités finissent ensuite d'être chargées à travers R1. Pour le calcul du temps d'équilibrage des charges entre C1 et C2, on pose :

$$V_{c1} = V_{c2} \text{ soit } K e^{-(t/T_{c1})} = (1 - e^{-(t/T_{c2})})K$$

Avec $T_{C2} = R2C2$, la constante de temps pour charger C2, lorsqu'on ferme I,

Et $T_{C1} = R2C1$, la constante de temps de décharge de C1 vers C2, et K la valeur finale.

On en déduit, le temps d'équilibrage qui est égal à 4,09 microsecondes (négligeable), puis la charge lors de l'équilibrage qui est de **91.3 %** de la valeur finale.

Il reste ensuite à déterminer **T3** qui est la constante de temps de **charge** totale des capacités **après leur équilibrage** (stabilisation de la mesure de tension) :

$$T3 = R1C1 + (R1+R2)C2 \text{ soit } 11 \text{ ms.}$$

En considérant que la valeur finale est atteinte à 0,15% en dessous de cette valeur, on obtient le temps pour atteindre la valeur finale en posant :

$$tr = t2 - t1 = (-11 \ln 0.0015) - (-11 \ln 0.087) = 44.6 \text{ ms}$$

Avec **t2** le temps pour atteindre 99,85% de la valeur finale

Et **t1** le temps pour atteindre 91,3% de la valeur finale (qui est le niveau de charge à l'équilibrage)

En conclusion le temps de stabilisation de la mesure pour ces voies est de **44,6 millisecondes**.

Comparaison avec les résultats expérimentaux :

En analysant les mesures, on constate la stabilisation après 11 ticks donc environ 44 millisecondes ce qui est très proche de l'évaluation théorique (au tick près).

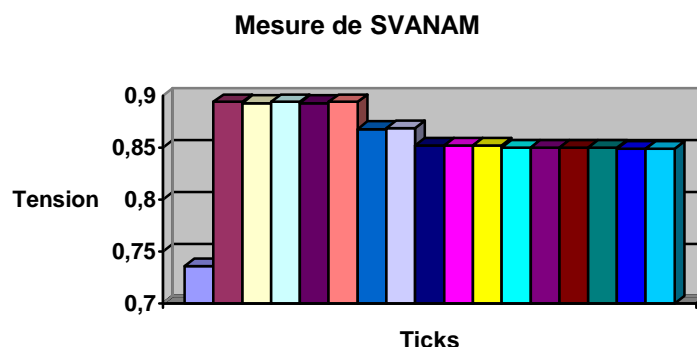


Figure 17 : Temps de stabilisation mesuré sur une entrée du multiplexeur

4.2.3.2. Valeurs choisies pour la librairie du programme d'acquisition du slow control

Le temps d'attente est contrôlé à l'aide du compteur 52 bits du power PC. Il a été choisi de définir les temps d'attente de stabilisation des mesures en fonctions des voies d'entrées :

- Chaque lecture d'une des 8 voies du CAN doit être réalisée avec une attente de 10 μ s minimum (lecture directe sur CAN). Ce temps est suffisant au regard du temps de conversion maximum annoncé par le fabricant du convertisseur qui est de 4 μ s. J'ai vérifié la nécessité de cette attente de conversion à l'aide du logiciel de test décrit précédemment
- Voies 10, 14 et 15 : attente 46 millisecondes minimum
- Autres voies (entrées multiplexeurs) : attente 23 millisecondes minimum

Le temps d'attente réel constaté est souvent supérieur de 10 à 20% au temps voulu. La programmation est réalisée pour attendre le temps minimum spécifié, ou plus longtemps. Aucune interruption n'est générée, les autres opérations du processeur sont prioritaires.

4.2.4 Le marquage en temps ou «Time Tagging »

Objectif :

Lorsqu'un évènement est détecté (génération d'un « trigger »), un signal d'interruption (Event Clock fast ou slow) est envoyé à la fonction de marquage en temps qui détermine l'heure précise de détection de cet évènement à l'aide d'une horloge 100 Mhz. Le module GPS (Ground Positioning System) à partir du signal qu'il reçoit des satellites, génère chaque seconde 1 top (1 PPS : One Pulse Per Second) dont la précision est meilleure que 10 nanosecondes et permet de corriger les dérives de l'horloge 100 Mhz. Le GPS est un module commercial « Motorola UT+ » connecté sur la carte unifiée par l'intermédiaire d'un connecteur Dubox 10 points. Pour le calcul du temps précis, le time tagging compte le nombre de cycles d'horloge (100 MHz) entre deux 1 PPS et en détermine la correction. De plus, sur interrogation, le GPS fournit une correction (le saw tooth) qu'il faut apporter au 1 PPS et qui peut varier entre + et - 50 nanosecondes. Ces diverses corrections, associées à des techniques de traitement du signal, permettent d'atteindre une précision de 8 nanosecondes. La fonction Time Tagging est intégrée dans un ASIC qui a été développé et testé dans notre laboratoire.

L'analyse du signal de la gerbe (sur chaque anode et sur la dernière dynode des photomultiplicateurs), mesuré par pas de 25 nanosecondes sur tous les détecteurs touchés, associée à la mesure précise du temps, permet de réaliser un tracé de la forme du front d'onde de la gerbe et d'en déduire la direction d'arrivée avec une précision meilleure qu'un 1 degré d'angle.

Formule de détermination du temps précis :

$$t(ns) = c_0 * (10^9 + ST(n+1) - ST(n)) / C_n + ST(n)$$

Avec $t(ns)$: instant dans la seconde

c_0 : cycle c_0 de la seconde n

C_n : nombre de cycle d'horloge à 100 MHz entre deux 1 PPS

$ST(n)$ est le saw tooth (dent de scie) de la seconde n : valeur fournie par interrogation du GPS

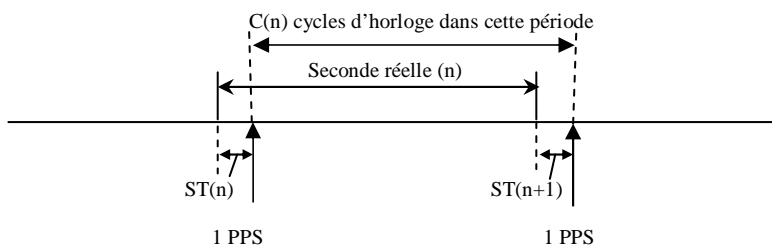


Figure 18 a : Méthode de correction du temps mesuré à l'aide du 1 PPS

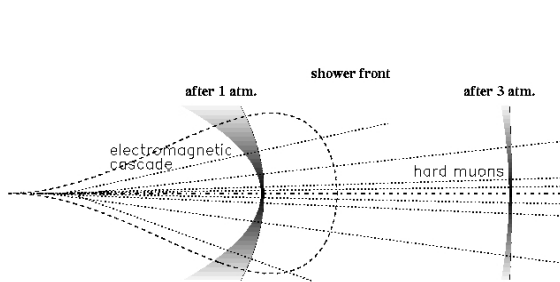


Figure 18 b : représentation du développement d'une gerbe
En fonction du nombre d'atmosphères traversés

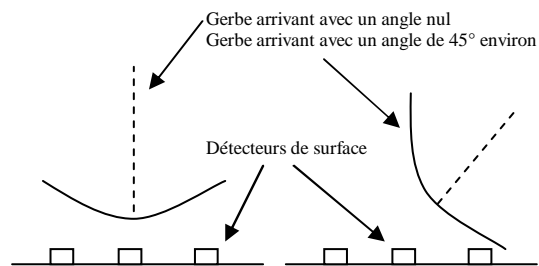


Figure 18 c : représentation de l'arrivée d'un événement à angle nul, puis avec un angle d'environ 45°

1 atm ou 1 atmosphère représente l'épaisseur de l'atmosphère terrestre par rapport à l'axe de la terre. En traçant une ligne avec un angle différent par rapport à cet axe, on constate que l'épaisseur d'atmosphère traversée est plus grande. Pour un angle très grand, un rayon cosmique traverse jusqu'à plusieurs fois l'équivalent de l'atmosphère terrestre.

Figure 18 : Détermination du temps d'arrivée des événements et analyse de leur direction de provenance

4.2.5 La configuration matérielle

Un ensemble d'interrupteurs permettent de configurer matériellement la carte. Ces configurations matérielles permettent notamment la mise en et hors tension de la carte, ou aussi, le passage en mode de reprogrammation de la mémoire Flash Eprom. En effet, pour cette reprogrammation, il convient, à l'aide des interrupteurs réservés, de passer le processeur Power PC en mode 8 bits et « Debug » (au lieu de 16 bits pour la Flash) pour la lecture de la mémoire PROM dite de sauvegarde. En mode de sauvegarde, cette PROM gère la connexion avec le « port de communication Ethernet » afin de permettre le chargement du nouveau programme dans la Flash via le réseau Ethernet. Après reprogrammation, la mémoire Flash doit être à nouveau verrouillée en écriture à l'aide de l'interrupteur prévu à cet effet afin de la protéger. Le retour au fonctionnement normal est réalisé par passage de la carte en mode « Norm » et « 16 bits ».

En plus de ces configurations matérielles, 2 boutons poussoirs PU1 et PU2 sont disponibles sur la carte. PU1 permet d'annuler la coupure d'alimentation de 3 heures commandée par la fonction « TPS » lorsque celle-ci est déclenchée par cette fonction. PU2 permet la remise à zéro manuelle (Reset) du Power PC.

4. 3 Moyens mis en place pour le développement de la carte unifiée

Une équipe de 2 électroniciens (1 ingénieur développeur et moi l'assistant) a réalisé la conception et gère la fabrication de la carte unifiée. La conception électronique est réalisée avec la chaîne C.A.O. (Conception Assistée par Ordinateur) CADENCE et avec l'aide de deux techniciens spécialisés. Deux électroniciens ont conçu l'ASIC time tagging. Deux informaticiens au Collège de France et plusieurs physiciens assurent le développement logiciel. Un responsable de groupe physicien coordonne l'ensemble des tâches. D'un point de vue matériel, plusieurs prototypes de la carte sont utilisés pour les tests et développements logiciels en France comme à l'étranger par d'autres membres de la collaboration. De plus, une cuve équipée avec l'électronique à été installée devant l'Institut de Physique Nucléaire d'Orsay (IPN) en France : cette cuve est d'une part une vitrine Française du projet, et d'autre part elle permet de réaliser des tests. Enfin, nous disposons d'enceintes climatiques à l'IPN pour réaliser des tests de qualification en température.

4.4 Intégration de l'électronique

4.4.1 *L'électronique du réseau prototype*

L'électronique du réseau prototype ou Engineering Array est modulaire en raison du partage des responsabilités concernant la conception de chaque partie. Ce réseau, a permis la mise au point des détecteurs avant le lancement de la production. Il est constitué de 35 détecteurs prototypes. L'électronique est installée dans un boîtier à l'abri des panneaux solaires (bonne protection contre les variations thermiques, éloignement des photomultiplicateurs pour une moindre perturbation électromagnétique, mais difficultés d'accès et problèmes de fiabilité du câblage soumis aux agressions externes). Cette électronique prototype est composée d'une carte mère (réalisée par notre laboratoire) distribuant les alimentations, les bus d'adresses et de données, et de plusieurs cartes filles : le processeur (réalisé par notre laboratoire), le contrôle des paramètres lents « slow control » (LAL), le marquage en temps (Laboratoire Temps Fréquence de Besançon) et le module GPS, le « Front End » avec son « trigger numérique » monté en carte fille (MTU USA) et une carte Ethernet pour les développements en laboratoire (PCC). Les responsabilités prises par notre laboratoire dans la conception des prototypes et le travail réalisé ont conduit la collaboration à nous confier la conception et la fabrication de la carte dite « unifiée » pour le réseau définitif dont le principe est présenté ci-après. Notons que l'usage dans les expériences de physique, consiste à nommer « collaboration » l'ensemble des personnes et groupes qui travaillent dans le cadre d'une même expérience.

4.4.2 *L'électronique définitive*

L'électronique numérique (PCC-CDF) est **montée sur une seule carte** (on l'appelle “carte unifiée” ou “Unified Board”). L'assemblage sur une seule carte permet d'obtenir une meilleure fiabilité, une meilleure intégrité du signal et un meilleur coût qu'avec un système modulaire dont la seule motivation était la meilleure maintenabilité. Cette électronique intègre l'ensemble des fonctions définies pour le réseau prototype, à l'exception du « Front End », du contrôleur de « Led Flasher » et du module GPS qui restent des cartes filles. L'électronique est **assemblée dans des boîtiers métalliques** permettant sa protection électromagnétique. Cet ensemble est installé au-dessus du plus large des couvercles d'accès aux photomultiplicateurs (Hatchcover 1) de la cuve sous un dôme en aluminium protégé par une peinture blanche contre le rayonnement solaire. Ce dôme est aussi une protection contre les difficultés

conditions environnementales et les aléas climatiques. Cette enceinte partiellement étanche permet la ***protection contre les projections d'eau et la pénétration de poussières*** tout en autorisant une faible circulation naturelle d'air pour éliminer la condensation à l'intérieur. L'ensemble étant placé au dessus de 12 mètres cubes d'eau, l'étanchéité totale est difficile et coûteuse à obtenir. Pour une protection optimale de l'électronique durant 20 ans contre la condensation, c'est-à-dire l'humidité et l'air salin, les cartes électroniques sont tropicalisées à l'aide d'un vernis de protection.

Du point de vue de la **protection contre les variations thermiques**, à la fin de l'année 2003, les températures de l'électronique relevées pour le réseau prototype (25 cuves) et le réseau "de production" (90 cuves) étaient similaires. Les températures en fonctionnement à l'intérieur de l'enceinte varient entre 0 et +60 degrés Celsius maximum (Valeurs extrêmes constatées durant moins de 2 heures pour les journées les plus froides en hiver et chaudes en été), ce qui est acceptable. Si une température beaucoup plus importante était relevée sur le réseau de production, une solution possible serait d'ajouter un deuxième toit pour un meilleur refroidissement par circulation d'air. Aucun problème lié à l'humidité dans l'enceinte n'a été constaté. Toutefois, les entrées d'aération ont été réduites au maximum en raison de l'observation de la pénétration de poussières.

En ce qui concerne le respect de l'intégrité du signal et les protections électriques, les plans de masse et leur câblage ont été conçus en réduisant au maximum les boucles de masse afin ne pas induire des courants et respecter aussi l'intégrité du signal. Le blindage des connecteurs en façade avant est relié à la masse pour ne pas induire de bruit «RF » dans le boîtier métallique. L'installation d'une protection complète contre la foudre n'est pas rentable en raison du faible risque et du coût élevé d'un tel équipement. Ainsi, il a été choisi de réaliser une masse commune de bonne qualité reliée à la terre afin de permettre la montée simultanée du potentiel de chaque partie et de se protéger contre les effets de radiation de la foudre tombant au voisinage du détecteur. L'utilisation de cette référence unique est de plus très bénéfique pour le respect de l'intégrité du signal. Une protection contre les décharges électrostatiques (ESD) sur les lignes de communication a été implémentée à l'aide de composants spécifiques (Surgix – protection contre les ESD jusqu'à 15KV).

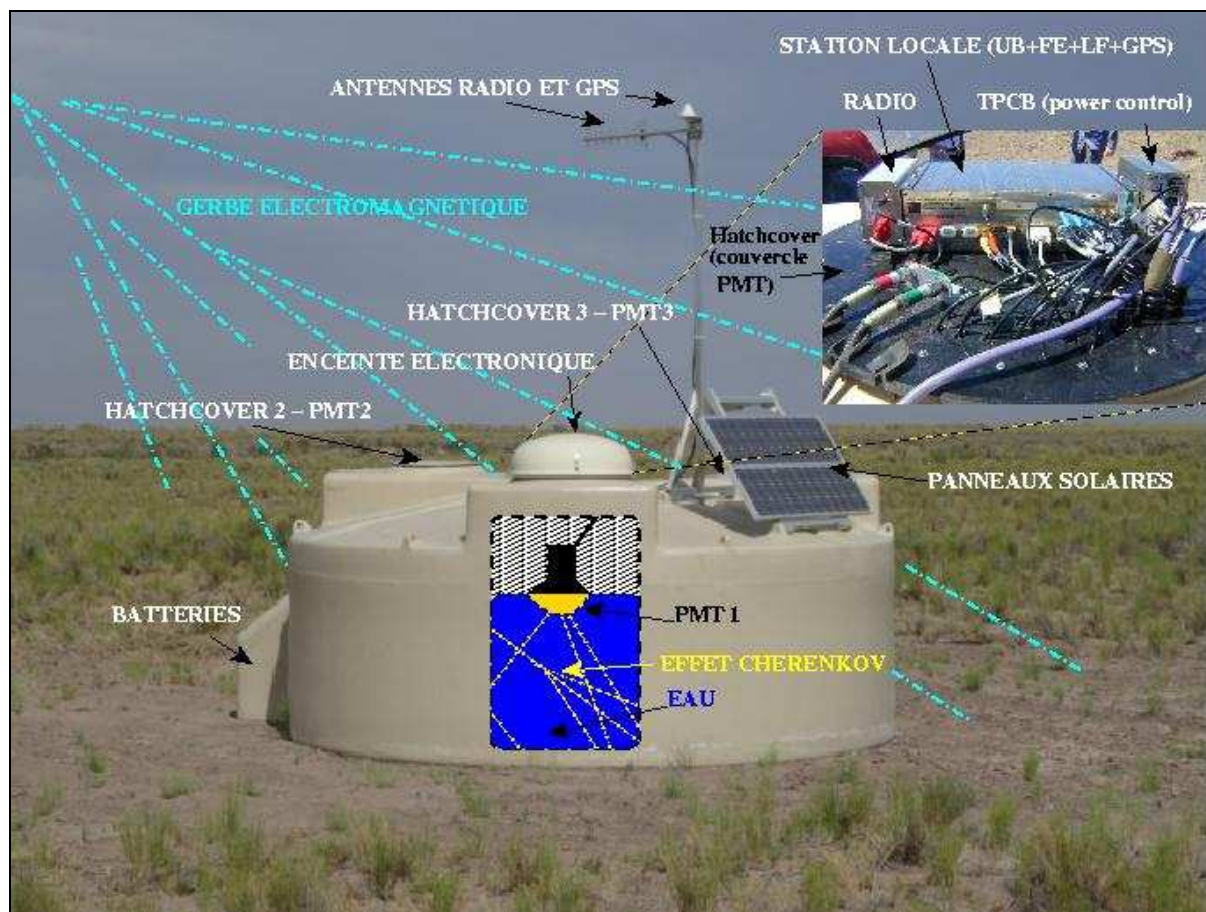


Figure 19 : Intégration de l'électronique sur un détecteur de surface

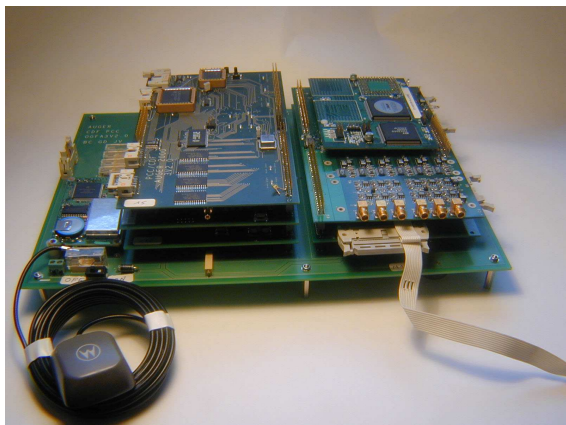


Photo 10 : Station locale du réseau prototype



Photo 11 : Electronique sur un détecteur



Photo 12 : Ensemble électronique « définitif »

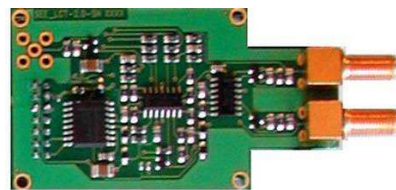


Photo 13 : Carte contrôleur Led Flasher

5. Evaluation de la fiabilité de l'électronique de AUGER

5.1. Introduction

L'étude du taux de défaillance et la fiabilisation de l'électronique constituent un des thèmes principaux de ce mémoire, en raison :

- De la longue durée de vie sollicitée : l'observatoire doit fonctionner durant 20 ans
- Du grand nombre d'équipements (1600 détecteurs dispersés sur 3000 Kilomètres carrés)
- De la difficulté et du temps d'accès à la plus grande partie du réseau
- Des importantes variations thermiques subies par les équipements jusqu'à parfois plus de 30 degrés sur une journée de 24 heures (les régions Andines sont en effet parmi les régions du monde où les variations journalières sont les plus fortes : la moyenne mondiale journalière est de l'ordre de 14 Degrés Celsius)
- De l'environnement salin (la Pampa Amarilla était il y a bien longtemps le site d'une mer)

Ces difficiles conditions environnementales imposent une vigilance particulière sur la fiabilité de la carte unifiée. De plus, étant donné la durée de vie du produit, il est indispensable de prévoir les stratégies de maintenance. En particulier, il convient de déterminer le nombre de composants de rechange ainsi que de cartes complètes, qui seront nécessaires pour le remplacement des éléments défaillants durant cette période.

La fiabilité d'un ensemble électronique est évaluée en calculant le temps moyen avant défaillance, ce que nous appellerons plus communément dans ce qui suit le M.T.T.F. (Mean Time To Failure). Pour l'évaluation de la fiabilité, il convient de choisir une méthodologie. Pour cela, J'ai utilisé la norme militaire Américaine MIL-STD-1629A ainsi que le recueil MIL-HDBK-338K. Tous mes calculs sont largement appuyés sur le recueil de normes de fiabilité RDF2000 (UTE C 80-810 de juillet 2000) de l'Union Technique de l'Electricité et de la Communication. Je présente dans ce chapitre la démarche adoptée lors de cette étude. Il conviendra de se référer aux documents cités ci-dessus pour de plus amples informations.

Les résultats de mon travail sur la fiabilité ont été présentés à la collaboration. De ce fait, certains schémas réalisés à l'aide d'outils logiciels spécifiques sont commentés en langue Anglaise.

Les objectifs de l'évaluation de la fiabilité sont multiples :

- Repérer les points faibles de la carte et apporter des modifications de conception ou de production si nécessaire
- Déterminer les différents modes de défaillance
- Evaluer le temps moyen avant défaut
- Evaluer la quantité de cartes et de composants de rechange nécessaire pour la durée de fonctionnement de l'observatoire
- Déterminer les procédures spécifiques de déverminage afin de réduire le nombre de défauts de jeunesse
- Déterminer les stratégies de maintenance
- Donner les valeurs limites de fonctionnement (température, tensions) et les précautions à prendre lors de l'intervention sur une carte.

Le tableau général de calcul de la fiabilité de chaque composant et de la carte unifiée, ainsi que du nombre d'éléments de rechanges nécessaires est présenté en annexes II.

5.2. Analyse des modes de défaillance

Lorsqu'on étudie la fiabilité d'un système, la première action est de déterminer tous les types de défauts que l'on peut rencontrer. Cette approche, est communément appelée AMDEC (Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets Critiques) ou aussi en Anglais FMEA (Failure Mode Effects Analysis) ou FMECA (Failure Mode Effects and Criticality Analysis).

Pour cette analyse, j'ai choisi d'utiliser 3 outils complémentaires :

- Etude de l'électronique en réalisant son schéma fonctionnel
- Schéma bloc fonctionnel d'analyse des modes et effets des défaillances des diverses fonctions
- Tableau présentant les défauts possibles et leurs effets

Le schéma fonctionnel :

C'est une représentation simplifiée du schéma de l'électronique. Il permet le recensement de toutes les fonctions et composants clés.

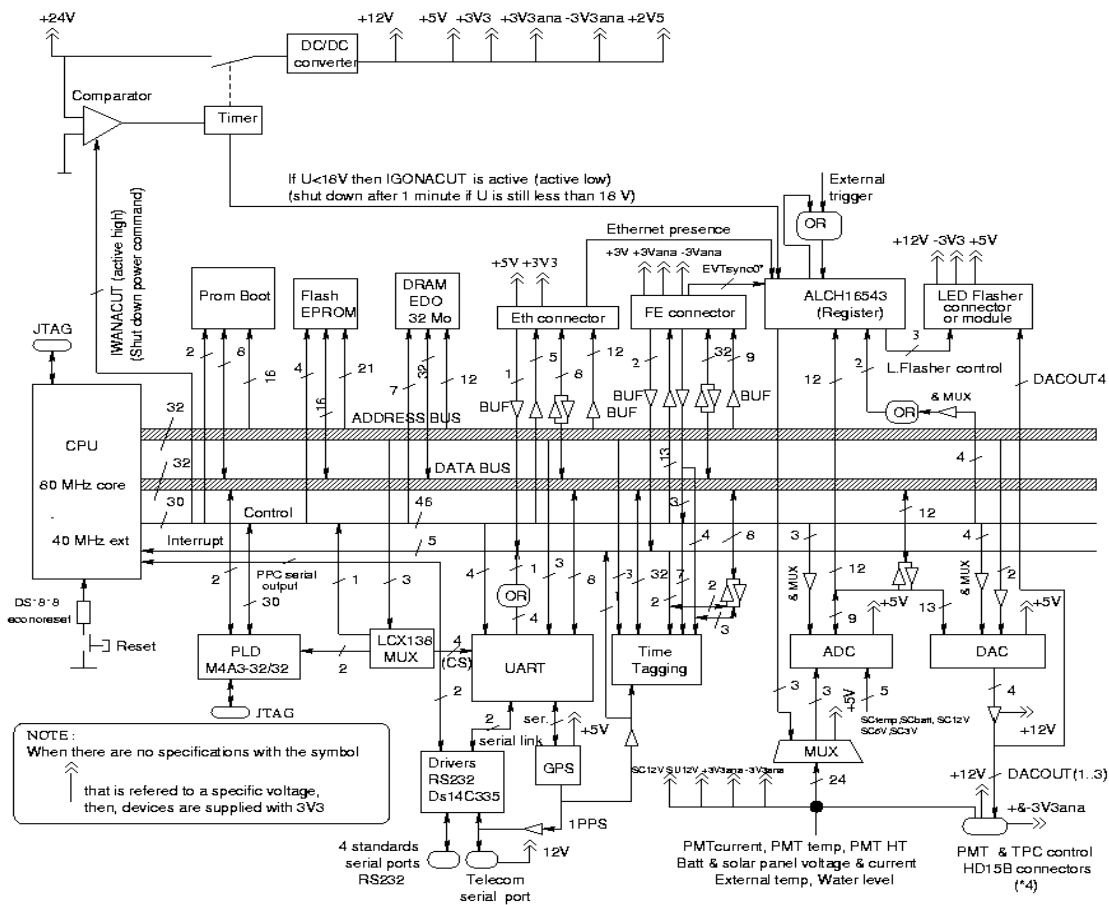


Figure 20 : Schéma fonctionnel de la carte unifiée

Le schéma bloc d'un point de vue fiabilité ou « schéma d'analyse des modes de défaillances » :

Il permet la mise en évidence des interactions des composants entre eux et facilite la définition des effets de la défaillance de chaque fonction sur les autres.

Tableau des modes de défaillance et analyse des effets :

Ce tableau est réalisé à partir de l'analyse fonctionnelle du système et du schéma bloc d'analyse des modes de défaillance. Il permet de décrire un maximum de cas de défaillances envisageables et leurs effets sur chaque fonction et sur la carte. Le tableau complet peut être consulté dans le document « The Reliability of the Unified Board » que j'ai écrit pour la collaboration Auger. Un extrait est donné ci-après. Ses différents champs sont :

Mode de défaillance : Description des conditions dans lesquelles une défaillance est observée et de son impact sur le fonctionnement du système.

Causes de la défaillance : Le processus physique, les défauts de conception, problèmes de qualité, défaillance d'un élément ou d'autres processus qui a entraîné la défaillance.

Effets de la défaillance : La ou les conséquences que la défaillance a sur le fonctionnement du système ou sur une de ses fonctions. Les effets des défaillances sont classifiés en effets locaux, niveau supérieur direct et effet final.

Effets au niveau supérieur direct : La ou les conséquences que la défaillance a sur le fonctionnement au niveau supérieur direct ou au niveau considéré.

Effet final : La ou les conséquences que la défaillance a sur le fonctionnement au plus haut niveau.

Actions provisoires : Actions qui peuvent être prises par un opérateur pour éliminer ou atténuer l'effet d'une défaillance sur le fonctionnement du système.

Niveau de sévérité : La sévérité considère la plus mauvaise conséquence d'une défaillance potentielle (Mort, blessures, dommages matériels). Ces niveaux de sévérité sont définis comme suit:

Catégorie I : Catastrophique – Une défaillance qui cause mort d'homme(s) ou de grave(s) blessure(s).

Catégorie II : Critique – Défaillance pouvant engendrer un dommage majeur sur le système et dont la conséquence peut être un mauvais fonctionnement d'une grande partie de l'observatoire.

Catégorie III : Marginal - Défaillance pouvant engendrer un dommage mineur et dont la conséquence peut être un retard ou une perte de disponibilité (besoin de remplacer la carte unifiée)

Catégorie IV : Mineur – Une défaillance pas suffisamment importante pour engendrer un dommage sur le système et empêcher complètement son fonctionnement et dont la conséquence est une action de maintenance future ou de réparation.

Notre carte électronique à elle seule ne peut entraîner de niveaux de sévérité I ou II.

A titre d'exemple, un niveau II dit critique pourrait être envisagé en cas de panne d'un relais radio, provoquant l'arrêt du fonctionnement du central d'acquisition de l'observatoire (CDAS) ou bien l'envoi d'un programme corrompu à toutes les stations ayant pour conséquence de les mettre hors service et rendant nécessaire une intervention sur chaque station dans la Pampa pour recharger les programmes. Ce type de « mésaventure » s'est produite lors de la phase de prototypage : un programme incorrectement testé et envoyé à 30 stations différentes, a entraîné le blocage de toutes les stations. Deux jours et deux personnes ont alors été nécessaires pour se rendre sur chaque station dans la Pampa et les remettre en route. Un même problème sur le réseau définitif de 1600 cuves ne représenterait pas moins de 3 mois de travail pour la remise en fonctionnement de tous les détecteurs par une seule équipe ! Ainsi, des précautions complémentaires ont été prises afin d'éviter l'envoi de programmes corrompus à toutes les stations en même temps :

- La mise en place d'un réseau test, d'une dizaine de cuves doit permettre par exemple de tester les nouvelles versions de programmes avant de les télécharger sur toutes les cuves.
- La partie contenant les programmes système est figée en grande partie et protégée
- Seulement le programme d'acquisition est susceptible de modification



Photo 14 : La pampa Amarilla : Un environnement salin, un terrain inondable et d'accès difficile...

Numéro de la fonction (schéma fiabilité)	Fonction	Mode de défaillance et causes	Effets de la défaillance			Méthode de détection de la défaillance	Actions provisoires ou suite à la défaillance	Niveau de sévérité	Remarques
			Local	Supérieur direct	Effet final				
...									
2	Protection et contrôle de l'alimentation	Pas de mise hors tension lorsque la tension est trop faible sur l'entrée ou coupure permanente de l'alimentation		Tension trop faible ou pas de tension	Problème d'alimentation	La consommation de courant est plus haute si la tension d'alimentation est trop faible ou bien il n'y a pas d'alimentation	Contrôler les composants relatifs à cette fonction 2 (Tank Power System)	III ou IV	
...									
4	CPU	Reset perpétuel, pas de signal en sortie du processeur ...	Le Power PC ne fonctionne pas		Le système ne fonctionne pas	Pas de message depuis le CPU, redémarrage constant, très faible ou haute consommation.	Contrôler le CPU et ses composants associés	III	
...									
94	Driver RS232 (« console »)	Pas de communication série possible par ce port	Port série hors service	Pas d'effet	Port série « console » hors service	Connexion via un PC. Pas de communication possible	Contrôler M4	IV	
...									

Tableau 1 : Extrait du tableau des modes de défaillance et analyse de leurs effets

5. 3. Calcul du MTTF pour la carte unifiée

5.3.1. Introduction

L'objectif de ce calcul est de pointer tous les composants critiques et de déterminer si notre équipement est correctement conçu d'un point de vue choix des composants. De plus, le calcul du temps moyen avant défaut est nécessaire à l'évaluation de la quantité d'éléments de rechange (cartes complètes et composants pour maintenance) utiles pour permettre le fonctionnement *du site pendant 20 ans*. Il est à noter que 20 ans représentent 175200 heures. Le MTTF est fortement dépendant de nombreux paramètres dont en particulier la température ambiante ainsi que sa variation journalière.

5.3.2. Procédure générale de détermination du taux de défaillance d'une carte

Lorsqu'on étudie la fiabilité d'un équipement on parle généralement de **MTTF** (Temps Moyen avant Défaut ou **Mean Time To Failure**), si l'appareil ou le composant n'est pas réparable ou de **MTBF** (Temps Moyen entre deux Défauts ou **Mean Time Between Failures**) lorsque l'appareil ou le composant est réparable. Ces deux taux sont généralement égaux. Nous préférons utiliser l'expression MTTF en ce qui concerne le calcul de la fiabilité des composants, ceux-ci n'étant généralement pas réparables. On parlera de MTBF pour la carte complète lorsque les défauts sont réparables (soudure défectueuse, remplacement du composant défaillant possible...)

La procédure la plus commune de détermination de la valeur du taux de défaillance d'une carte électronique (ou d'un système) est de réaliser la somme de tous les taux de défaillance calculés individuellement pour chaque composant. Cette somme est ensuite ajoutée au taux de défaut du circuit imprimé qui est fonction du nombre de composants soudés dessus. Pour des fonctionnements particuliers ou s'il existe des redondances, il est préférable de s'appuyer sur les méthodes décrites dans la norme américaine MIL-STD-756 afin de déterminer le taux de défaillance effectif de la carte.

Le calcul du MTBF est réalisé comme suit :

$$\lambda_s = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \dots + \lambda_n = \frac{1}{MTBF}$$

Avec λ le taux de défaillance pour le composant désigné.

Ce taux est exprimé en **FIT (Failure In Time)** qui représente le nombre de défauts probables par milliard d'heures (1 **FIT** = 1 défaut / 10^9 heures).

Il a été choisi d'utiliser le recueil de fiabilité "RDF 2000 - UTE C 80-810" pour le calcul des taux de défaillance. Les méthodes de calculs présentées dans ce recueil sont les plus récentes disponibles ou ont été adaptées. En effet, les calculs ont été révisés en utilisant les retours d'expérience de plusieurs dizaines de milliers de cartes électroniques ayant fonctionné entre 1992 et 1998 dans des installations de télécommunications. Un extrait des abaques présentés dans le RDF 2000 ainsi que le tableau de calcul de la fiabilité de chaque composant et de la carte sont présentés en annexes II. Un autre moyen d'évaluer la fiabilité est d'utiliser le recueil militaire américain MIL-HDBK-217F. En utilisant les méthodes décrites dans ce recueil on obtient des résultats proches de ceux obtenus avec la « RDF 2000 ». Toutefois, les données de ce recueil n'ont pas été remises à jour récemment et les paramètres utilisés sont moins réalistes que dans la « RDF 2000 ».

Le taux de défaillance est évalué pour des conditions normales de fonctionnement. Le taux de défaillance de base peut être interpolé à l'aide des valeurs de stress électrique (comprises entre 0 et 1) et en utilisant les équations d'interpolation. Toutefois l'extrapolation de tout taux de défaillance au-delà des valeurs définies est complètement invalide.

5.3.3. Paramètres considérés

Notre système est utilisé en conditions fixes et en extérieur (« ground fixed » : Environnement modérément contrôlé, l'installation est dans une enceinte non chauffée, circulation naturelle de l'air, contraintes mécaniques : accélération $< 10 \text{ m/s}^2$, fréquence de vibrations < 200 hertz). En utilisant les données relevées sur les détecteurs déjà installés, on a mesuré au cours d'une année une température moyenne pour l'électronique de 32 degrés Celsius. La variation thermique moyenne journalière de la température a été évaluée à 22 degrés Celsius (1 cycle thermique par jour) alors qu'à titre de comparaison la moyenne mondiale se situe à 14 degrés. Les valeurs des plus hautes de température ont une influence très néfaste qui agit de manière exponentielle sur la fiabilité de l'électronique. Il est à remarquer qu'on peut observer des températures de l'électronique allant jusqu'à 60 degrés Celsius en plein été, pendant une durée journalière inférieure à 2 heures. Si les températures les plus basses ne sont pas critiques pour l'électronique, il convient toutefois de prendre en considération qu'en fonctionnement la température de l'électronique peut baisser jusqu'à 0 degrés en plein hiver

austral et en pleine nuit. De plus, cette électronique doit être dimensionnée pour supporter des démarrages à froid exceptionnels pour des températures pouvant descendre jusqu'à -20 degrés Celsius. Les valeurs minimales représentent un stress thermique engendrant des défaillances par effet de contraction.

A l'aide des relevés de températures observées sur le site, il a été évalué la fiabilité des composants pour chaque température et instant et calculé à partir de ces résultats le taux de défaillance global de ces composants. La valeur moyenne de température qu'il convient d'appliquer au calcul pour obtenir le même résultat est de 35 degrés Celsius.

Par sécurité pour l'évaluation de la fiabilité et le choix des composants, on considère pour l'étude de la fiabilité :

- La température ambiante : 40°C
- La variation thermique journalière : 25°C
- La gamme de température de fonctionnement des composants : -20 à +70 degrés Celsius
- Qu'il n'y a pas de fonctions redondantes (la redondance permet d'améliorer la fiabilité générale d'un système. Elle est utilisée surtout dans le spatial car il n'y a pas de possibilité de maintenance)
- Le fonctionnement permanent (24 heures sur 24, 365 jours par an, pendant 20 ans)

5.3.4. Effet des éléments soudés

La majorité des défaillances sont la conséquence de mauvaises soudures.

La méthode décrite dans le RDF-2000 inclue l'effet des parties soudées dans le taux de défaillance de chaque composant. Le taux de défaillance pour le circuit imprimé est calculé séparément.

Dans le MIL-HDBK-217F, la valeur du taux de défaillance des soudures pour une carte complète est celle du composant qui représente le point le plus faible, c'est à dire avec le plus important taux de défaillance du point de vue des soudures. Cette méthode considère que le système doit être totalement renouvelé après une défaillance du point le plus faible.

5.3.5. Taux de défaillance du circuit imprimé

En utilisant le RDF 2000, le calcul de ce taux est réalisé en considérant pour notre carte :

- La largeur des pistes : 2/10 millimètres
- Le nombre de trous (en incluant les traversées « vias ») : 1746
- 2357 pattes de composants dont 468 équipotentielles
- La surface de la carte : 816 centimètres carrés
- La température ambiante et sa variation journalière définies précédemment
- Le nombre de couches métallisées : 4
- La surface de la carte (240*340 mm)
- La finition nickel or pour les plages d'accueil qui permet de faciliter la soudure des composants

5.3.6. Taux de défaillance des circuits intégrés

En priorité on utilise les données fournies par les fabricants (parfois issues de retours d'expérience) sur lesquelles on applique la formule d'Arrhenius (effet de la température sur le taux de défaillance – voir le paragraphe consacré). En l'absence de données le RDF 2000 peut être utilisé. La méthode de calcul peut être décrite comme suit :

$$\lambda_{\text{Circuit Intégré}} = \lambda_{\text{puce}} + \lambda_{\text{boîtier}}$$

Dans ce calcul, les facteurs intervenant sont :

- L'environnement électrique du circuit est considéré à l'aide d'un facteur spécifique : l'influence d'un composant en interface avec une électronique externe est de 10 FIT. L'influence sur la défaillance de base des drivers de communication série RS232 est de 70 FIT car leur exposition aux décharges électrostatiques est importante. Pour les autres composants l'environnement électrique n'a pas d'influence
- L'énergie d'activation, la résistance de jonction, la puissance dissipée
- La température ambiante et sa variation journalière
- Le type du circuit (silicium MOS, bipolaire ...) et le nombre de transistors
- Le type de boîtier et son nombre de pattes

Dans des conditions d'utilisation « appareil fixe », selon le « RDF 2000 », le retour d'expérience d'équipements indique que les entrées et sorties d'un circuit intégré sont mises en court circuit avec l'alimentation du circuit lors de 5% des défauts, qu'elles sont mises en court-circuit avec la masse pour 5 autres pour cents et sont mises en circuit ouvert pour les 90% de défauts restants.

5.3.7. Taux de défaillance des condensateurs

Les condensateurs tantales :

Pour les condensateurs tantales j'ai utilisé les données du constructeur AVX dont le taux de défaillance s'écrit :

$$\lambda_c = F_U \times F_T \times F_R \times \lambda_B$$

Avec F_U le facteur de correction du rapport tension de fonctionnement sur la tension nominale,

F_T le facteur de correction en fonction de la température de fonctionnement,

F_R le facteur de correction selon la valeur de la résistance série,

Et λ_B la valeur du taux de défaillance de base qui est de 1% pour 1000 heures pour un tantale.

La tension de fonctionnement a une très grande influence sur la fiabilité tout comme la température. Pour une fiabilité optimale, on a choisi des condensateurs ayant une tension maximale de fonctionnement spécifiée par le constructeur représentant le double de leur tension d'utilisation. De plus il n'y a que très rarement des mises en et hors tension de l'électronique, ce qui permet d'obtenir une fiabilité optimale pour les condensateurs tantales de notre carte. Enfin, dans certaines circonstances, les tantales ont des capacités d'autoréparation limitées. Dans 20% des cas, lors d'une défaillance les tantales se mettent en circuit ouvert et en court-circuit dans 80% des cas. Lorsque ces condensateurs sont utilisés pour le découplage, nous considérons seulement les défauts faisant apparaître un court-circuit.

Condensateurs céramiques :

Selon le fabricant de condensateurs AVX, le vieillissement des condensateurs entraîne une perte de capacité et une décroissance du facteur de dissipation. Le vieillissement est engendré par le réalignement graduel de la structure cristalline des condensateurs céramiques. Après

100 000 heures, la capacité a décrut de 7,5% de sa valeur originale. Pour notre application le fonctionnement du système n'est pas altéré par cette dégradation en raison de sa faible influence surtout lorsque ces condensateurs sont utilisés pour le découplage et du temps relativement long de cette dégradation.

Les paramètres pris en compte pour le calcul du taux de défaillance sont la température et sa variation journalière, le facteur d'utilisation (tension d'utilisation / tension maximale) que nous avons choisi inférieur à 0,5. Dans 70% des cas de défaillances le condensateur se met en court-circuit et en circuit ouvert dans 30% des cas. Lorsque ces condensateurs sont utilisés pour le découplage, seules les défaillances entraînant un court-circuit sont considérées comme préjudiciables.

5.3.8. Autres taux de défaillance

Résistances :

La température et sa variation journalière, ainsi que de la puissance dissipée ont une influence majeure sur le taux de défaillance. Dans 40% des cas les résistances défaillantes se mettent en circuit ouvert et il y a variation de leur valeur dans 60% des cas. Je considère pour notre application seulement les défaillances entraînant un circuit ouvert sauf pour les résistances de précision où toutes les défaillances sont considérées.

Connecteurs :

Le taux de défaillance des connecteurs dépend du nombre et du type des connections et aussi de la température et de sa variation journalière. Pour le choix du type et de la classe des connecteurs l'environnement est considéré. En effet, il a été choisi généralement la classe la plus sévère (classe 1 ou 2) en raison de l'environnement salin qui est considéré comme agressif pour les connecteurs.

5.3.9. Evaluation rapide et approximative de quelques taux de défaillance

Pour une évaluation approximative, il est possible d'utiliser les données fournies dans le recueil de formules GIECK (traduction française par G.Bendit – ISBN 3920379287). Ci-dessous sont présentés quelques exemples typiques de taux de défaillance indiqués dans ce

recueil. Ces taux sont surestimés en comparaison aux résultats fournis dans le recueil de fiabilité de l'UTE (RDF 2000).

ø CI – transistor bipolaire : 10 FIT	ø CI–analogique bipolaire (Ampli op.) : 10 FIT
ø Transistor – Si – universel : 5 FIT	ø Transistor de puissance – Si : 100 FIT
ø Diode silicium : 3 FIT	ø Condensateur tantale : 0.5 à 5 FIT
ø Condensateur céramique : 10 FIT	ø Condensateur papier : 2 FIT
ø Condensateur chimique : 1 FIT	ø Résistance chimique : 0.5 à 5 FIT
ø Résistance métallique : 0.2 FIT	ø Résistance bobinée : 10 FIT
ø DEL : 500 FIT	ø Soudure manuelle : 0.5 FIT
ø Interrupteur : 5 à 30 FIT	ø Connections sans soudure : 0.0025 FIT
ø Connections en force : 0.26 FIT	ø Contact à fiches (connecteurs): 0.3 FIT
ø Prise électrique : 0.4 FIT	ø Quartz : 10 à 150 FIT selon la fréquence
ø Fusible : 20 FIT	

Tableau 2 : résultats typiques de taux de défaillance exprimés en FIT (Recueil GIECK)

5.3.10. La Règle d'Arrhenius

Lorsque le MTTF est donné par le constructeur pour une température différente de celle pour laquelle l'évaluation de fiabilité (à 40 degrés Celsius) est réalisée, la règle d'Arrhenius peut être utilisée pour re-calculer le taux de défaillance avec la température fixée. En effet, cette règle permet d'évaluer la dépendance du taux de défaillance avec l'évolution de la température :

$$\lambda(T_2) = \lambda(T_1) \times \exp \left[\frac{E_A}{K} \times \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) \right]$$

Avec la constante de Boltzman : $K = 8.63 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$

La valeur de E_A en eV, l'énergie d'activation de défaillance spécifique à chaque type de composant est évaluée par expérience pour différents mécanismes de défaillance. Les valeurs les plus fréquemment utilisées pour différents types de composants sont :

- Composants optiques : 0.8 eV
- Circuits intégrés bipolaires : 0.7 eV

- Circuits intégrés MOS : 0.6 eV
- Transistors : 0.7 eV
- Diodes : 0.7 eV

Le facteur d'accélération est décrit par une fonction exponentielle.

T_1 est la température de jonction en opération normale (température pour laquelle est calculée le taux de défaillance par le fabricant) exprimée en Kelvin, T_2 est la température de jonction pour les nouvelles conditions de stress exprimée en degrés Kelvin, $\lambda(T_1)$ le taux de défaillance en opération normale, $\lambda(T_2)$ le taux de défaillance pour les nouvelles conditions de température.

5.4. Evaluation statistique des défaillances au cours du temps

5.4.1. Introduction

A partir de la connaissance des taux de défaillance individuels des composants et de l'ensemble, il devient possible d'évaluer la distribution statistique des défaillances durant la période de fonctionnement spécifiée. L'objectif est de déterminer pour une population concernée, le nombre d'éléments défaillants au bout de cette période. Pour réaliser cette étude, il est considéré :

- Le taux de défaillance de chaque composant et / ou de la carte complète
- Le cycle de vie souhaité pour notre équipement : 175200 heures
- 1600 cartes unifiées installées dans la Pampa Argentine plus les cartes de rechange (fixé à 230 cartes au regard des premières évaluations de fiabilité)
- Le taux de défaillance des composants de rechange en stock est aussi considéré

5.4.2. Courbe caractéristique des probabilités de défaillance

La courbe caractéristique de la probabilité de défaillance d'un système en fonction de son âge est connue pour sa forme de baignoire. En effet, le cycle de vie d'un produit est généralement décomposé en 3 périodes distinctes :

- La période de jeunesse où la probabilité de défaillance est grande en raison des imperfections de fabrication, par exemple les soudures de mauvaise qualité, ou un composant défectueux. Ce sont des défauts de jeunesse. Ces défauts peuvent être éliminés en grande partie en réalisant un déverminage (application de cycles en température sur les cartes) suffisant durant la production
- La période de vie utile : taux de défaillance constant
- La période de vieillesse : augmentation de la probabilité de défaillance

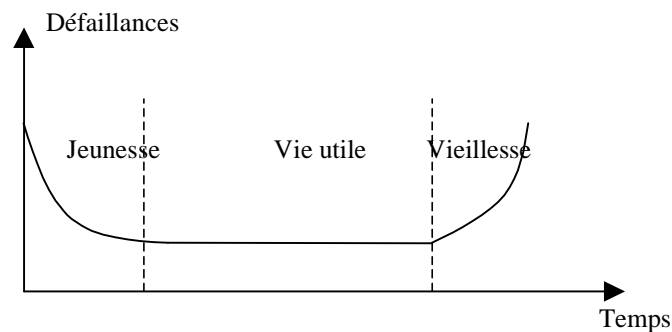


Figure 22 : Courbe de défaillance en forme de « baignoire »

5.4.3. Distribution exponentielle

La distribution exponentielle est la méthode de distribution la plus utilisée pour modéliser la défaillance des systèmes électroniques. Elle se caractérise par :

- Un taux de défaillance constant (période de vie utile). La probabilité de défaillance à chaque instant dépend seulement du temps passé depuis la mise en service du produit.
- Une défaillance n'entraîne pas automatiquement la défaillance d'un composant voisin.
- Elle présente l'avantage d'avoir un seul paramètre et d'être facilement estimable.
- Elle est applicable à beaucoup de systèmes.
- Les nombres de défaillances définies pour chaque composant et pour une période précise sont additionnables pour déterminer le nombre de défaillances du système complet pour cette durée.
- Cette méthode suppose que la mortalité infantile a été éliminée par une procédure de déverminage et de brûlage (voir chapitre consacré).

La fonction de densité de défaillance s'exprime :

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}$$

Où λ est le taux de défaillance.

La fonction de fiabilité s'exprime :

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad \text{Que l'on peut relier à la fonction de défaillance par la relation : } F(t) = 1 - R(t)$$

Le principal inconvénient de cette méthode qui considère le taux de défaillance comme constant au cours du temps, est qu'elle entraîne pour certains composants une mauvaise estimation de la fonction de répartition des défauts. En particulier, cette méthode ne permet pas de considérer une probabilité quasi nulle de défaillance durant les premières années de fonctionnement de certains composants.

Exemple d'application de cette distribution :

Soit un composant ayant un taux de défaillance de 100 FIT (100 défauts par milliard d'heures). Pour un lot considéré on recherche le pourcentage de composants défaillants au bout de 20 ans soit 175200 heures. En posant $R(t) = e^{-((100/1000000000)*175200)}$ on en déduit que ce composant a 98,26% de chances de fonctionner durant 20 ans et donc 1,74% d'être défaillant. Pour 1000 composants on prévoira donc au minimum 18 composants de rechange pour la maintenance.

5.4.4. Loi de Weibull

Pour une estimation plus précise, s'il est possible de déterminer les paramètres concernant le vieillissement des composants, il est alors intéressant d'utiliser la loi de Weibull. Elle constitue la méthode la plus populaire pour la prédiction des défaillances de tous types. Cette méthode prend en compte l'ensemble du cycle de vie des équipements (mortalité infantile, défaillances aléatoires et défauts de vieillesse). Les paramètres de cette fonction sont déterminés à l'aide des données issues du retour d'expérience du type d'équipement dont on cherche à évaluer la fiabilité. C'est à dire que sur une population donnée d'équipement on a

relevé l'ensemble des défaillances. Cette méthode est efficace même avec un nombre réduit de mesures. L'analyse de Weibull est en particulier très utilisée pour les actions de maintenance préventive en mécanique, où la durée de vie des composants est fortement liée à la période de vieillesse. La distribution de Weibull est basée sur la loi exponentielle, mais avec deux paramètres additionnels. Elle s'écrit comme suit :

$$\underline{R(t) = \exp \left[-\left(\frac{t-\gamma}{\eta} \right)^\beta \right]}$$

Avec γ la durée minimale de vie (aucun défaut ne peut apparaître avant), η le paramètre d'échelle (moment auquel 63,2 % de la population sera défaillant – souvent égal à 1) et β le paramètre de forme. Quand $\beta < 1$ la fonction “taux de défaillance” est décroissante (jeunesse), quand $\beta = 1$ elle est constante (vie utile : défauts aléatoires) et quand $\beta > 1$ elle est croissante (vieillesse).

5.4.5. Conclusion sur le choix de la méthode d'évaluation statistique

L'analyse de Weibull permettrait de minimiser l'estimation du taux de défaillance de certains composants par la considération d'une durée de vie minimale. On pourrait aussi pour certains autres composants prendre en compte un vieillissement, c'est-à-dire un nombre de défauts accrus au-delà d'un certain temps. Mais l'emploi de cette méthode implique d'utiliser un retour d'expérience pour chacun des composants montés sur la carte afin de pouvoir estimer les paramètres de la fonction.

Généralement la période de vieillesse pour les composants électroniques intervient très loin dans le temps, en regard de la durée de vie utile ou de fonctionnement des équipements (considérée entre 3 et 20 ans en moyenne par le RDF 2000). Ainsi, on peut admettre l'absence de la période de vieillesse pour les équipements électroniques.

La conception et la fabrication de la carte sont considérées comme bonnes et correctement maîtrisées, en particulier en raison de l'application de règles de conception et de la mise en oeuvre de la procédure de déverminage. Ainsi, les défauts de jeunesse peuvent être négligés.

E En conséquence, je choisis d'utiliser la loi exponentielle pour évaluer la distribution statistique des défaillances.

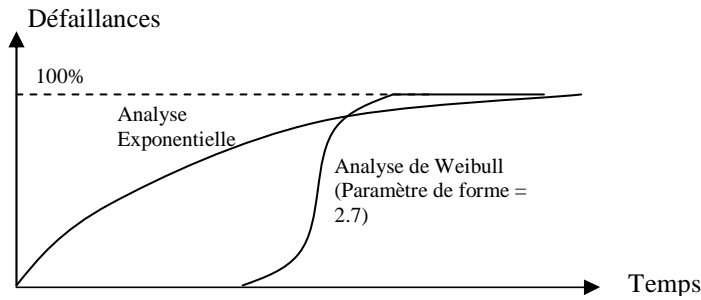


Figure 23 : Comparaison entre la loi exponentielle et la loi de Weibull

5.5. Intervalles de confiance

Pour un grand nombre d'échantillons (>50), les erreurs d'estimation obéissent à une loi Normale (courbe de Gauss ou Gaussienne). Généralement, les fabricants de composants fournissent une estimation de la fiabilité dans un intervalle de confiance de 60 %. Le degré de précision de cette estimation est ainsi meilleur à une fois l'écart type de la moyenne des défaillances. Cette précision de l'estimation s'appuie donc sur un grand nombre d'échantillons.

Plus la taille de l'échantillon est grande et plus précise est l'estimation statistique. La relation entre la précision de l'estimation et le nombre d'échantillons est la suivante :

$$\text{Précision estimation} = \frac{\text{précision de la mesure}}{\sqrt{\text{Racine carrée du nombre d'échantillons}}}$$

Ainsi, pour une précision de mesure finie (par exemple on mesure une valeur avec une précision de 10%), l'augmentation du nombre de mesures permet d'atteindre une précision statistique meilleure que la précision de la mesure.

De manière générale, pour un échantillon de N pièces dont les valeurs de fiabilité en nombre d'heures sont x_1, x_2, \dots, x_n ,

$$\text{La valeur moyenne s'écrit : } \bar{x} = \sum_{i=1}^N \frac{x_i}{N}$$

$$\text{Et l'écart type s'écrit } \sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{(x_i - \bar{x})^2}{N-1}}$$

Pour réduire au maximum l'intervalle de confiance et améliorer la précision de l'estimation, l'estimation doit donc être réalisée à partir d'un très grand nombre d'échantillons.

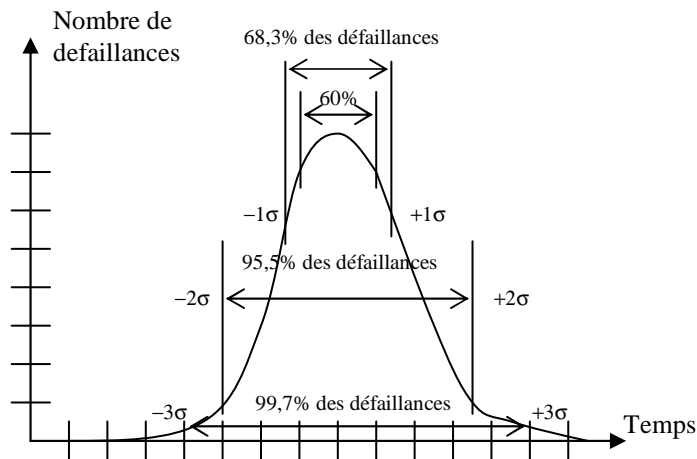


Figure 24 : distribution Gaussienne des défaillances

La méthode de mesure de fiabilité :

A partir d'un échantillon de N composants, fonctionnant dans les conditions nominales et pour une durée spécifiée, on relève le nombre de défaillances. Les résultats obtenus permettent d'évaluer la fiabilité du composant.

Exemple :

- 1000 composants
- 1000 heures d'essai
- 1 défaillance relevée sur le lot

Donc le taux de défaillance s'exprime :

$$F = \frac{N_{def}}{N_c \times N_h}$$

Avec « F » le taux de défaillance, « Ndef » le nombre de défauts relevés, « Nc » le nombre de composants dans le lot et « Nh » le nombre d'heures d'essai.

D'où $F = 1 / (1000 \times 1000)$ soit $F = 1.10^{-6}$ défaut par heure soit $F = 1000$ FIT

Donc le MTTF = 1 000 000 heures.

En faisant la supposition que les défauts suivent une loi de distribution exponentielle, il pourra à tout instant être évalué par cette loi de distribution le nombre d'éléments défaillants.

5.6. Optimisation de l'estimation de fiabilité

Pour cette étude, le choix retenu est de considérer seulement la méthode la plus simple et commune d'estimation de la fiabilité globale d'un système. Cette méthode consiste à considérer que toutes les fonctions sont assemblées en configuration série, c'est à dire que les taux de défaillance de tous les composants sont additionnés. Cette méthode considère alors, que toute défaillance d'un composant entraîne la mise hors service de la carte. Pour minimiser l'influence des défaillances individuelles des composants, lors de la conception, des redondances de fonctions peuvent être implémentées. Les taux de défaillance de toutes les fonctions redondantes, montées en configuration parallèle, sont alors multipliés entre eux. La fiabilité globale est alors améliorée. Rappelons qu'il n'y a pas de fonctions redondantes sur la carte unifiée. Cette méthode est généralement utilisée dans les applications dont la sécurité de fonctionnement est vitale, comme dans le spatial ou dans certains domaines médicaux.

De manière générale, comme il l'a été réalisé au paragraphe 5.2, on utilise certains outils de représentation du fonctionnement du système afin de déterminer si un composant spécifié peut engendrer une défaillance générale du système ou si un fonctionnement dans un mode dégradé sans ce composant en défaut est possible. Il a été réalisé un schéma fonctionnel d'analyse des modes et effets des défaillances. La représentation par réseau de Pétri est aussi un outil fréquemment utilisé. La logique floue peut être aussi parfois utilisée dans certaines études (en considérant par exemple chaque fonction et sa classe de sévérité afin de déterminer leur influence sur la fiabilité globale). Plus généralement, la logique floue est utilisée pour l'estimation des paramètres inconnus intervenant dans les calculs de fiabilité. On réalise cela en s'appuyant sur un retour d'expérience ou une opinion d'expert. Remarquons, que pour réaliser une analyse complète s'appuyant sur ces méthodes il est nécessaire d'utiliser un programme de simulation spécifique.

5.7. Evaluation du taux de défaillance et de la quantité d'éléments de rechange

Parce que la majorité des défaillances sont réparables et le nombre de cartes de rechange est limité par leur coût, il doit être prévu une stratégie de maintenance où on choisit de réparer certains défauts et remplacer les cartes lorsqu'elles ne sont pas réparables. 230 cartes de rechanges pour les 1600 cartes installées dans la Pampa ainsi qu'un stock de composants de rechange sont prévus à cet effet. Cette quantité de cartes de rechange, en plus de permettre le remplacement des éléments non réparables, permet de réaliser un roulement indispensable

pour le remplacement des cartes en réparation. En effet, en considérant un temps moyen de 6 mois pour leur réparation, les calculs présentés en annexe II, font apparaître la nécessité de réserver au minimum 26 cartes pour le remplacement des éléments défectueux durant cette période. Les cartes réparées, à leur retour, sont ensuite réintégrées dans le stock d'éléments de rechange.

5.7.1 Définition du pourcentage d'éléments remplaçables

L'ensemble des estimations présentées ci-dessous concernant la réparabilité et la capacité d'identification des causes de défauts a été réalisé à partir de l'expérience qui a déjà été acquise sur le réseau prototype et des conseils "d'experts" électroniciens.

A partir de ces avis, on considère que 80% des causes de défaillances peuvent être identifiées. Les 20% restant de défaillances sont non identifiables (trop de défaillances sur la même carte, ou panne complexe) et représentent par exemple 154 cartes pour une température moyenne de 40°C et une variation thermique journalière de 25°C selon les calculs présentés en annexes II. Lorsque les composants, causes de la défaillance peuvent être identifiées, certains d'entre eux peuvent être difficiles à remplacer en raison du faible pas de leurs pattes. La quantité de cartes de rechange utiles lorsque le défaut ne peut être réparé doit être déterminée. Ainsi, on évalue que dans 10% des cas de défaillance d'un Power PC ou d'une UART (TL16C754), 50% des cas pour un PLD ou une PROM (AT27LV010) et 90% des cas pour un ASIC ou des connecteurs et autres circuits intégrés il est possible de remplacer le ou les composants concernés. Les autres composants ne posent pas de problème de remplacement.

Les cartes et composants stockés ont aussi un taux de défaillance qu'on doit considérer dans l'évaluation du nombre d'éléments de rechange. Pour cette estimation, il est pris en compte les taux de défaillance suivants (source RDF-2000) :

- Cartes complètes en stock : $\text{taux normal} \times 0,2$
- Connecteurs, oscillateurs, circuit imprimé et résistances en stock : $\text{taux normal} \times 0,1$
- Condensateurs et alimentations en stock : $\text{taux normal} \times 1$
- Transistors, diodes, circuits linéaires en stock : $\text{taux normal} \times 0,2$
- Circuits intégrés numériques en stock : $\text{taux normal} \times 0,5$

Les types de défaillance et les modes sont décrits pour chaque composant dans le RDF-2000. En effet, comme il est indiqué en 5.3, concernant l'évaluation de la fiabilité de différents types de composants, certains défauts peuvent entraîner des mises en court-circuit ou bien en circuit ouvert de l'élément concerné. Pour certains, le type de défaut entraîne dans tous les cas

une défaillance générale du système. En revanche, une capacité de découplage en circuit ouvert après un défaut n'a pas d'influence notable sur le fonctionnement du système.

Pour **le début du déploiement** des cartes, les **risques de défaillance sont accrus** en raison des mauvaises manipulations et de procédures mal maîtrisées, d'erreurs de conception importantes ou de problèmes dans le « process » de fabrication. Pour prendre en considération ces effets, après m'être informé sur les retours d'expérience de divers équipements électroniques à partir des études réalisées pour la rédaction du RDF 2000, de plusieurs informations recueillies et de divers avis d'experts, j'ai choisi d'augmenter de 50% le taux de défaillance évalué pour les 130 premières cartes et de 10% pour les 300 suivantes. De surcroît, pour **prendre en considération** les problèmes de **conception**, de **fabrication**, les **erreurs humaines** (mauvaises manipulations), les risques de décharges électrostatiques (**ESD**) et la **foudre**, j'ai choisi d'augmenter le taux de défaillance global évalué **de 10%** pour toutes les cartes. Ces évaluations sont réalisées aussi à partir de nos premiers retours d'expérience sur les détecteurs déjà installés au moment de cette étude.

5.7.2 Taux de défaillance globale et quantité de cartes de rechange nécessaires

Pour 40 degrés de température moyenne et 25 degrés de variation journalière, il a été calculé :

- **MTBF = 30,45 années** soit un taux de défaillance = 3749 FIT
- 770 défaillances durant 20 ans
- **3,21 défaillances par mois** (facilement gérable par l'équipe de maintenance)
- 240 cartes de rechange sont utiles durant cette période en incluant la phase de déploiement

Ces résultats sont pris en compte pour la détermination des quantités d'éléments de rechange à approvisionner (voir annexe II). Si le taux de défaillance dépasse les valeurs estimées des actions correctives doivent être menées. Dans la mesure du possible, toutes les défaillances sont analysées.

Pour couvrir nos besoins, 230 cartes de rechange sont prévues sur les 240 nécessaires. De surcroît, nous avons fait fabriquer 120 cartes supplémentaires avant le début de notre production par nos collègues des USA afin d'accélérer la mise en service des premiers détecteurs. Notre calendrier de début de production était incompressible en raison des contraintes de préparation du marché public de production que nous aborderons dans le chapitre suivant. Ces cartes, sont donc aussi des éléments de rechange supplémentaires disponibles permettant ainsi de couvrir entièrement nos besoins. Toutefois, je préfère les

considérer seulement comme un tampon de sécurité, car nous n'avons pas une connaissance approfondie des méthodes de production utilisées pour celles-ci.

Les composants de rechange sont (ou vont être) achetés en considérant l'évaluation de la fiabilité pour chaque composant (voir le tableau d'évaluation en annexes II).

Remarquons enfin, qu'il reste envisageable de fabriquer 200 cartes supplémentaires à la fin de la production, en cas de demande d'extension du réseau au-delà de 1600 détecteurs.

Calcul pour d'autres valeurs de température et de variation thermique journalière :

Température moyenne	50	40	40	40	35	30
Variation thermique	30	30	25	20	20	20
MTBF en années	18.8	29.1	30.45	32.1	38.7	45.26
Nombre défaillance / 20 ans	1047	796	770	742	645	571
Nombre défaillance / mois	4.37	3.32	3.21	3.1	2.7	2.38
Nombre de rechanges	320	251	240	228	202	183

Tableau 3 : Influence de la température et de sa variation journalière sur la fiabilité

On voit clairement à l'analyse du tableau 3 que c'est la température ambiante qui agit le plus sur la fiabilité. Plus la température est élevée, plus la fiabilité se dégrade. L'influence des variations thermiques journalières est moindre.

Etude de l'évolution du nombre de défaillances pour 40°C de température moyenne et 25°C de variation journalière :

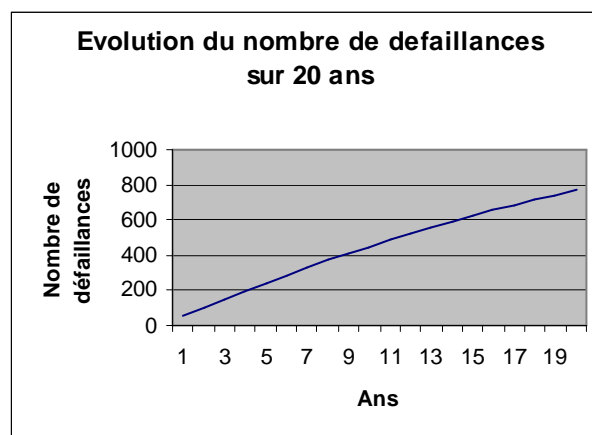
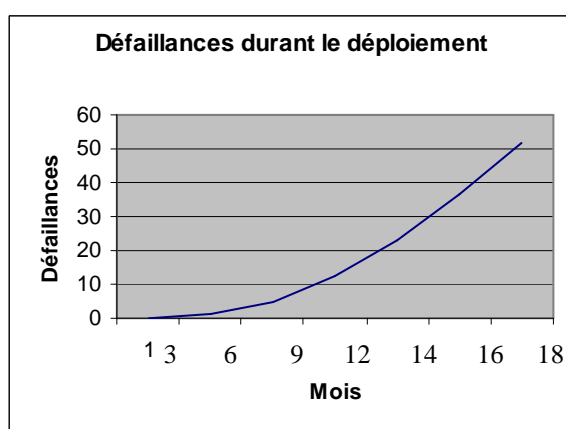


Figure 25 : défaillances durant le déploiement **Figure 26 : défaillances pour 1600 cuves**
(Valeurs calculées en considérant les risques de défaillance accrus en début de déploiement)

On suppose pour cette étude en figure 25 que le déploiement des cartes sur le site se déroule sur 18 mois, avec 130 cartes installées les 3 premiers mois, puis une moyenne de 100 cartes installées par mois, jusqu'au déploiement complet.

5.8. Stratégies de maintenance

L'évaluation du nombre d'éléments de rechange au paragraphe 5.7, ainsi que la décision de fabriquer seulement 230 cartes de rechange dites « spares » sans considérer la production Américaine, conduit à fixer des règles de maintenance. Ainsi, étant donné le nombre de ces « spares », 72% des cartes présentant un défaut doivent être dépannées. Par conséquent, si on observait en moyenne plus de 3 cartes non réparables sur 10 cartes en défaut, une action corrective devrait être menée. Les cartes étant garanties 2 ans, elles sont retournées durant cette période chez le fabricant. La politique de maintenance au-delà de la garantie doit être définie. Il peut être envisagé de réaliser un contrat de maintenance en France ou bien d'organiser la maintenance en Argentine qui pourrait être réalisée par une société privée ou directement à l'observatoire. Cette dernière solution, préférable en terme de coût et de temps, impose de former des techniciens et acheter le matériel adéquat. Il convient enfin de définir les responsabilités. Pour des raisons de risque d'obsolescence, les composants de rechange doivent être approvisionnés le plus tôt possible.

5.9. Pour une meilleure fiabilité

Pour conserver une fiabilité optimale, il convient de maîtriser la température à l'intérieur de la boîte électronique. Celle-ci ne doit jamais excéder les valeurs limites de fonctionnement des composants, c'est-à-dire une gamme de température de -20 à +70°C et doit être de préférence comprise entre 0 et +40°C, valeurs au dehors desquelles la fiabilité décroît rapidement. Il convient aussi de limiter les mises en et hors tension du système qui sont critiques pour la fiabilité des composants électroniques, car elles entraînent des stress électriques. Notre électronique fonctionnant en permanence, il n'a pas été prévu de défauts liés à ce risque dans nos calculs de fiabilité.

La bonne protection contre les conditions environnementales permet aussi de conserver la fiabilité optimale. Dans cet objectif, les cartes sont tropicalisées pour les protéger contre l'environnement difficile (air salin, humidité). On a choisi un vernis de type SRC DAT V2, qui est référencé pour les applications militaires. Ce vernis peut être totalement retiré pour des besoins de maintenance en utilisant un solvant spécifique. Un marqueur sensible aux rayons

Ultra Violets permet de contrôler l'uniformité du vernis de tropicalisation sur la carte. Avant tropicalisation, la carte doit être asséchée afin de ne pas emprisonner de l'humidité et les connections actives doivent être épargnées. Le séchage complet du vernis est réalisé par un passage à l'étuve durant 6 heures à 60°C pour une bonne polymérisation. La cuve en polyéthylène et la poussière en suspension dans l'atmosphère, associées au vent sec en été rendent l'environnement très chargé. Pour les interfaces en liaison avec les connecteurs externes, des composants protégés contre les décharges électrostatiques (ESD) ont été choisis, c'est-à-dire des « drivers RS232 » et des multiplexeurs analogiques protégés, ainsi que des composants pour la protection des lignes les plus sensibles (ESD suppressors – Surgix : évacuent les ESD par la masse) ont été ajoutés. De plus, pour travailler sur les cuves ou dans le hall d'assemblage, un bracelet conducteur connecté à la masse métallique de l'électronique et des talonnettes anti-statiques pour une protection contre les importantes charges statiques accumulées sur le tank ou par l'opérateur doivent être utilisés.

Le nombre estimé de perte de stations en raison des effets de la foudre a été évalué à environ 10 par an pour 1600 détecteurs. Sur 200 stations installées au cours des deux dernières années, seul un à deux cas de défaillances liés à la foudre ont été suspectés. Pour une protection minimale et suffisante contre les effets de la foudre, il a été choisi de réaliser une très bonne masse commune reliée à la terre pour l'ensemble de l'électronique (voir paragraphe 4.4.2.).

Pour ne pas dégrader la fiabilité, il convient de réaliser la fixation de chaque partie avec précaution afin de minimiser les efforts mécaniques sur la carte. Les zones où les contraintes mécaniques sont les plus grandes sont les diagonales traversant les cartes. Les composants de grande taille (ou avec beaucoup de pattes) doivent être placés lors de la conception, hors de ces lignes de contraintes pour une meilleure fiabilité. Enfin, un raidisseur est monté sur la carte afin de limiter sa déformation en particulier durant la fabrication et le transport.

Pour l'assemblage des différents éléments, il convient de considérer que les mauvais couplages entre les métaux du boîtier en aluminium de l'électronique peuvent entraîner une circulation de courant dans la masse et une dégradation plus rapide du boîtier. Il peut être utilisé un mastic de couplage entre 2 métaux différents (écrous en inox et boîte en aluminium par exemple) pour prévenir ce risque. De plus, le boîtier doit être protégé contre la corrosion si nécessaire.

Enfin, le nombre réduit de couches pour le circuit imprimé (4 couches pour notre carte) et l'utilisation de composants montés en surface, facilite et réduit les coûts de fabrication, ce qui est par conséquent bénéfique pour la fiabilité. On n'utilise pas de composants en boîtiers BGA pour une maintenance plus aisée sur le site.

5.10. Retour d'expérience

Pendant la période de déploiement, il est nécessaire de détecter le plus tôt possible toutes les défaillances dues à une erreur de conception, de production, de procédure de déploiement ou autre. Il est donc nécessaire de mettre en place une procédure de suivi des cartes pour déceler rapidement les problèmes de fiabilité et essayer de trouver des solutions. Un retour d'expérience est en outre très utile pour étudier toutes les défaillances et les effets du vieillissement et enregistrer les résultats dans une base de données (Base de donnée « Auger » où les données pour chaque carte sont enregistrées dès la fabrication) pour une maintenance facilitée lorsque les défauts sont récurrents (description du type de défaut, et solutions ou réparations réalisées. Cette base de données inclut tous les éléments des détecteurs). De plus, il a été mis en place un outil nommé « Bugzilla » par nos collègues Américains qui permet à chaque membre de la collaboration d'enregistrer tous les problèmes rencontrés (électronique ou logiciel) et les solutions lorsqu'elles sont trouvées. Cet outil logiciel « Web » (sur Internet) envoie automatiquement un message électronique aux personnes désignées lorsqu'un nouvel enregistrement est réalisé. Au-delà des défaillances, cette procédure est très intéressante pour détecter les problèmes mineurs et conduire des actions de maintenance préventive. De plus, l'expérience acquise sur le site sud pourrait être très utile pour la construction éventuelle d'un nouveau détecteur dans l'hémisphère nord. Plus généralement, en regard de la grande taille de l'observatoire un bon retour d'expérience est intéressant pour d'autres expériences de physique ou observatoires dans le futur avec des équipements électroniques installés dans des conditions similaires. Un bon suivi, permet de déclencher une « alarme » si le nombre de défaillances est supérieur à celui attendu. Chaque défaillance est étudiée et des actions correctives sont entreprises si nécessaire. Il a par exemple été constaté durant la première série de production trois défaillances (sur 120 cartes) pour un même module convertisseur. Une analyse avec le fabricant de ces convertisseurs nous a permis de mettre en évidence que ces composants sont affectés par les procédures de lavage (indispensables) durant la fabrication. La surélévation de ces modules sur la carte et leur étancheisation est la solution envisagée. L'influence de ce problème sur la fiabilité globale reste encore à quantifier.

Les études menées par le recueil de fiabilité « RDF 2000 » indiquent que dans des « conditions d'équipements fixes », la fiabilité des composants est influencée fortement par les conditions climatiques, l'environnement électrique et par les contraintes mécaniques appliquées sur les composants soudés ou sur le circuit imprimé. Le taux de défaillance dû à l'humidité n'est pas significatif (mais l'équipement doit être protégé contre les projections

d'eau et la condensation sur les parties froides) ainsi que celui dû aux chocs mécaniques, vibrations ou à une contamination chimique.

Organisation générale d'une procédure de retour d'expérience :

- Etape 1 : Préparer
 - Définition des objectifs de la fiabilité (réalisé par cette étude)
 - Définition de la base de données et codification des informations
- Etape 2 : Organisation de la procédure de retour d'expérience
 - Ressources humaines et techniques
 - Organisation de la circulation des informations
 - Information / formation => procédures (systématiques et occasionnelles pour les personnes travaillant sur l'électronique)
- Etape 3 : Fonctionnement
 - Collection des informations de mauvais fonctionnement
 - Transmission pour mise à jour de la base de données
- Etape 4 : Exploitation
 - Sélection des informations
 - Exploitation
 - Comparaison avec les objectifs
- Etape 5 : Actions correctives
 - Conditions d'intégration des cartes (premièrement, il doit être vérifié que le problème n'est pas la conséquence d'une erreur humaine durant l'intégration ou les tests)
 - Conditions de maintenance
 - Intervention humaine (erreur humaine, mauvaise manipulation, choc mécanique...), environnement proche (foudre, décharges électrostatiques)
 - Problème sur la carte (une action corrective pourra être menée seulement après avoir vérifié que les points précédents ne sont pas à l'origine de la (des) défaillance(s) constaté(es))

Enfin, un retour d'expérience efficace nous permettra de vérifier et d'affiner nos évaluations sur la fiabilité de notre carte.

Défaillances intervenues dans le champ :

L'étude de fiabilité ne prend pas en compte le réseau prototype. Toutefois, la majorité des défaillances constatées sur ce réseau sont le fait de la mise du système dans un état incertain qui oblige l'opérateur à se rendre sur le détecteur pour le réinitialiser. Depuis le début du déploiement du réseau définitif, aucune action de maintenance n'est réalisée sur ce réseau prototype. Depuis 3 ans qu'est installée cette électronique dans les champs, aucune détérioration due aux conditions environnementales n'a été constatée alors même que ces cartes ne sont pas tropicalisées. La majorité des défaillances sur ce réseau a été constatée durant le déploiement. Leurs causes principales étaient dues aux défauts de jeunesse en raison de mauvaises soudures ou à des décharges électrostatiques entraînant la défaillance de composants fragiles. Certains défauts étaient liés à la détérioration de câbles par les vaches ou les rongeurs. Le câblage a été modifié en conséquence pour le réseau définitif.

En ce qui concerne le réseau définitif, pour 320 cartes installées au cours de l'année écoulée (entre avril 2003 et avril 2004), 3 défaillances réelles ont été observées sur le site, auxquelles il faut ajouter 3 défauts mineurs. Une défaillance concerne une mémoire Flash certainement en raison d'un défaut de jeunesse et deux autres concernent un module convertisseur DC/DC de 12 Volts. Une seule défaillance s'est produite dans le champ, les deux autres ayant été détectées au moment des tests. De plus, un défaut de soudure, et deux absences de composants ont aussi été détectés durant les tests avant l'installation dans le champ. Le premier était lié au test fonctionnel incomplet réalisé durant la fabrication de la carte, les deux autres résultaient vraisemblablement de chocs durant le transport. Des inscriptions sur l'emballage ont en conséquence été ajoutées pour indiquer aux douaniers et transporteurs la fragilité du contenu.

Nos déplacements réguliers sur le site permettent de réaliser un suivi des cartes en ce qui concerne la fiabilité. Pour l'instant, le taux de défaillances observé est normal. Il conviendrait de réaliser une action corrective dans le cas d'un dépassement significatif des prévisions. Des cartes ont été retirées du champ après environ 3 mois de fonctionnement : nous n'avons pas constaté de dégradations dues à l'environnement.

Extension de la réflexion à l'ensemble des éléments du détecteur :

Il conviendrait d'évaluer le taux de défaillance de chaque élément du détecteur et de confronter les résultats aux observations sur le terrain. Cela permettrait d'évaluer les besoins futurs en maintenance. Une équipe travaillant dans la Pampa durant une journée peut réaliser

la maintenance d'un maximum de 15 cuves dans le cas où les conditions d'accès sont faciles (en été, par temps sec) et où les interventions sont rapides. 12 cuves en été est souvent un chiffre plus réaliste, et en hiver, 5 cuves semble une bonne moyenne. Une rapide évaluation, en prenant en compte tous les éléments d'un détecteur, me conduit à dire, qu'un minimum de 20 défaillances diverses par mois (Batteries, radio, UB, FE, GPS, LF, TPCB, panneaux solaires...) sont à prévoir pour le site complet. A ces défaillances, il convient d'ajouter la nécessité de réinitialisation de certaines stations (problème radio par exemple ne permettant pas la réinitialisation à distance, ou la nécessité d'éteindre la station durant un certain temps). Ainsi, il est raisonnable de prévoir la visite mensuelle d'environ 30 cuves. La formation d'une équipe dédiée aux actions de maintenance dans le champ d'expérience est à l'étude.

5.11. Conclusion sur la fiabilité

Toutes les fonctions de notre carte ont un temps moyen avant défaillance estimé supérieur à 20 ans. Il n'y a pas de fonctions critiques d'un point de vue de la fiabilité sur notre carte. Pour les calculs, il a été considéré des conditions d'environnement plus sévères que les valeurs réelles. De plus, il a été appliqué un facteur significatif (+10%) sur le taux global de défaillance pour prendre en compte les pannes liées à la foudre, aux décharges électrostatiques et aux erreurs humaines. Toutefois, comme nous l'avons indiqué, certaines défaillances peuvent être négligées lorsqu'elles n'affectent pas profondément le fonctionnement du système et permettent de conserver un fonctionnement en mode dégradé.

Un suivi le plus rigoureux possible doit être mis en place enfin d'analyser toutes les défaillances. Si le nombre de défauts constatés s'avère plus important que celui attendu, alors une action corrective doit être menée. On doit s'assurer aussi durant ce suivi, que les protections électromagnétiques et contre les intempéries sont correctement dimensionnées.

Enfin, les retours d'expérience de l'industrie électronique indiquent que le taux de défaillance réel, est généralement dans la réalité inférieur à celui calculé, du moment où les règles élémentaires concernant la fiabilité décrites précédemment ont été respectées. Afin de valider cette étude, j'ai pris contact avec un consultant en fiabilisation de produits industriels et aéronautiques. Il nous a enseigné des méthodes générales de fiabilisation et je lui ai présenté pour validation mon évaluation sur la fiabilité des cartes, ainsi que nos procédures de déverminage, de test et de qualification des cartes. Après analyse, il a validé et confirmé notre étude.

PARTIE III: PRODUCTION ET TEST DES CARTES UNIFIEES

6. Conduite de projet, qualité, suivi de production

6.1. Introduction

En raison de la grande taille de l'observatoire et du nombre important de collaborateurs, et toujours dans l'objectif d'atteindre une fiabilité maximale, la conduite du projet (dans tous ses aspects : administratifs, organisationnels et techniques) est une activité majeure dans mon travail sur ce projet. Mon principal souci étant de satisfaire les besoins clients (les physiciens) dans les délais définis avec une qualité acceptable. J'ai personnellement rédigé l'ensemble des documents concernant la gestion de production et la qualité.

Un automaticien doit savoir appréhender un système dans son ensemble, c'est un généraliste. A ce titre, la conduite de projet, et par conséquent la gestion de production est de son ressort. Dans le cadre de ce projet, la gestion de production consiste à :

- Préparer :
 - Définir les besoins : Cahier des charges
 - Subdiviser le travail en tâches et définir les intervenants
 - Concevoir, prototyper, tester sur le site d'expérience et fiabiliser
 - Respecter les coûts : le choix des composants est réalisé en considérant les performances, la consommation, la fiabilité et les coûts
 - Mise en place des phases et des jalons
 - Mise en place du plan de gestion de la qualité.
 - Appel d'offre (L'objectif qualitatif demande une préparation rigoureuse pour la fabrication des cartes, ce qui m'a conduit à préparer et suivre le marché public de production des cartes)
 - Dossier de fabrication
- Gérer :
 - Suivi de production, actions correctives sur la production ou la conception
 - Respect des délais
 - Qualité

- Sûreté de fonctionnement (fiabilité)
- Documentation
- Contrôler (afin d'atteindre la fiabilité requise pour l'équipement)
- Exploiter (installation sur le terrain, retour d'expérience)

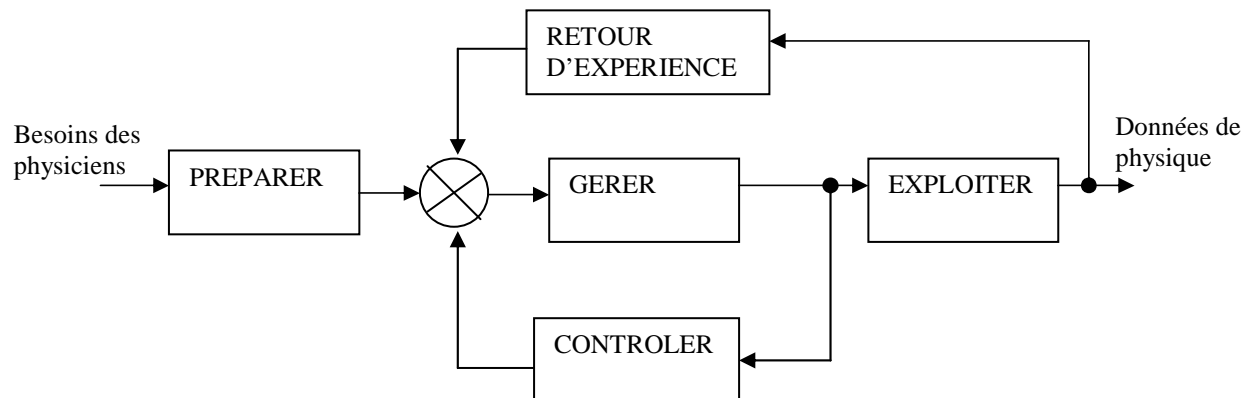


Figure 27 : représentation du processus de gestion de production

6.2. Les principales phases du projet

La préparation de la production est constituée de plusieurs étapes consécutives : la définition préliminaire du produit et sa conception, sa définition détaillée, la planification, la gestion de la qualité et la mise en place de la gestion de production.

6.2.1. Le cahier des charges et la phase de conception

Les besoins sont d'abord exprimés par la collaboration des physiciens. Ainsi, la première phase du projet consiste en l'étude de faisabilité et la rédaction de propositions préliminaires. Lorsque la faisabilité est démontrée, la deuxième phase de la conduite de projet consiste en l'écriture de la **revue de définition préliminaire (PDR : Preliminary Design Review)**. Cette revue est préparée en rédigeant plusieurs documents : le plan de management qui définit notamment les responsabilités, le dossier de propositions préliminaires, et le plan d'assurance qualité. C'est alors que commence l'étude des différentes solutions possibles ainsi que la réalisation des premiers prototypes. Les responsabilités étant partagées, les équipes participant à la conception sont en contact permanent dans l'objectif de l'intégration de toutes les parties de l'électronique. L'avancée des travaux et les résultats préliminaires sont publiés dans des rapports d'avancement (Gap notes) à l'attention de l'ensemble de la collaboration.

Le cahier des charges évolue en permanence en fonction des problèmes rencontrés par les collaborateurs, de l'évolution des besoins des physiciens (évolution continue !), et de ce qui fait aussi la recherche : les discussions non officielles et les nouvelles idées. Pour notre projet le cahier des charges a été définitivement figé au début de l'industrialisation (réalisation de 10 premiers prototypes industriels).

6.2.2. L'industrialisation

Lors de la conception du produit, en raison de sa fabrication à 1830 exemplaires, les contraintes de production doivent être prises en compte. La minimisation des coûts et des délais et la nécessité d'obtenir la meilleure fiabilité pour le produit manufacturé impliquent la prise en compte de ces contraintes en particulier pour le choix des composants pour lesquels le prix, la disponibilité et les possibilités d'équivalence doivent être considérés. Au moment de la conception, il convient d'ajouter des repères sur le circuit imprimé et d'adapter l'orientation des composants aux contraintes des outils automatisés de production.

L'industrialisation consiste aussi à écrire l'ensemble des instructions et procédures de fabrication, valider la nomenclature des composants (et les équivalences en cas d'indisponibilité) et les fichiers de fabrication et modifier la conception de la carte électronique afin de l'adapter au process de fabrication.

Des procès verbaux sont établis à différentes étapes de la fabrication (Enregistrement d'opérations ou de résultats de tests : tableaux, fiches de suivi, bases de données). Des corrections doivent être réalisées lorsque des problèmes sont détectés durant la production.

Une revue de définition détaillée (que j'ai présenté devant les membres de la collaboration et des personnalités extérieures) appelée aussi « **CDR** : Critical Design Review » a marqué la fin de la phase de conception. Cette revue a permis de vérifier la conformité du produit avec les besoins, valider la conception, le choix des composants, la sûreté de fonctionnement, le dossier industriel et d'apporter les correctifs sollicités par les membres du comité de la revue (« Reviewers »). Afin de présenter notre travail, un rapport technique de conception a été rédigé (« Technical Design Report » : description R&D, organisation, intégration, tests...).

Le « Production Readiness Review » (ou P.R.R.) est la revue d'autorisation de lancement en production. Cette revue consiste en l'écriture d'un document (en Anglais), présentant nos procédures, documents et moyens concernant la production des cartes unifiées. J'ai rédigé et

présenté oralement ce document devant un comité de revue constitué de membres de la collaboration AUGER durant une réunion à Malargüe qui s'est tenue au mois de novembre 2003. Cette revue permet en particulier de vérifier que tous les documents nécessaires au fournisseur sont prêts et que toutes les procédures sont correctement recensées. Parmi les éléments présentés il y a la procédure d'appel d'offre, le dossier de fabrication, le plan de management de la qualité et les conditions d'acceptation des cartes. On y présente de plus le calendrier de production, le plan de financement, les éléments concernant la conception et la fiabilisation de l'électronique et les procédures de test et d'intégration.

6.2.3. La planification des tâches

Il y a de nombreuses tâches interdépendantes dans le projet. La conduite de projet nécessite la planification des tâches en adéquation avec les délais sollicités par le management du projet. La planification inclut tous les éléments en rapport avec la carte à produire et est réalisée à l'aide de méthodes de gestion de projet (Méthode du chemin critique, Gantt...) afin de définir les délais maximaux et besoins pour chaque tâche (approvisionnements, mise au point de procédures de tests, fabrication de cartes filles...). Toutefois, pour prendre en compte les différents aléas, des corrections régulières des plannings doivent être réalisées afin de planifier les ordres de fabrication.

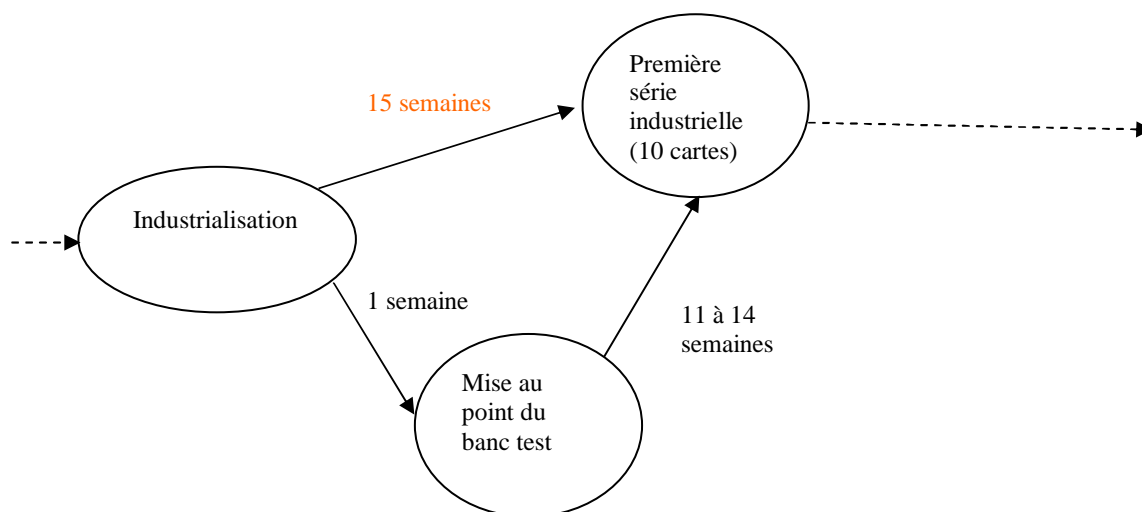


Figure 28 : Exemple de détermination d'un chemin critique

(Ici, la mise au point du banc test ne doit pas dépasser 14 semaines)

En réalisant une représentation par la méthode du chemin critique (diagramme PERT), toutes les tâches peuvent être listées, et il devient plus facile de déterminer les délais souhaitables pour le projet en entier ou pour un groupe d'opérations. La détermination du chemin critique permet de réaliser le planning (Gantt).

Le constat :

Le contexte de recherche induit des changements réguliers du cahier des charges et des délais supplémentaires. La recherche vise à atteindre un résultat plutôt qu'une rentabilité à court terme. De plus, les projets sont parfois retardés pour des raisons budgétaires ou politiques ou de problèmes de ressources humaines ou de manque de réactivité (problèmes administratifs, nécessité d'acquérir de nouvelles compétences pour la production des cartes...). La coordination des tâches entre plusieurs équipes est aussi un vecteur de retard. Enfin, en raison de la priorité exclusive (allocations) donnée aux entreprises ayant un fort poids commercial (Téléphonie, informatique), les délais d'approvisionnement peuvent être parfois très longs et varier très rapidement. De plus, l'obsolescence rapide de certains composants peut, s'il elle n'est pas prévenue, entraîner une modification de la schématique et remettre en cause la conception et la production.

La conclusion :

Dans un marché de l'électronique tendu et en raison du partage des responsabilités entre plusieurs laboratoires, les délais sont souvent fortement dépassés. Malgré cela, la planification reste indispensable. Elle permet de fixer des « jalons » et d'exercer une pression minimale pour ne pas dévier de façon importante du planning initial. Elle est un outil pour la gestion efficace des approvisionnements et des ordres de fabrication. La planification est un outil essentiel dans la relation avec l'industriel en charge de la fabrication dans l'objectif du respect de la qualité, des délais et des coûts. Des pénalisations financières sont applicables à la partie (industriel ou demandeur) ne respectant pas les délais imposés comme défini dans le contrat.

6.3. Plan de gestion de la qualité

Le plan de gestion de la qualité dont j'ai été en charge de la rédaction pour la fabrication de la carte unifiée (« Quality Management Plan for the Unified Board production ») décrit les caractéristiques principales du produit. Il présente les sociétés sous-traitantes, leurs références,

leurs outils de production et les moyens humains. Il présente technologiquement la carte ainsi que les spécifications de fabrication (Approvisionnement des composants, tests de fabrication et procédures de test fonctionnel, déverminage, tropicalisation, emballage, gestion des données techniques...). Il détaille les méthodes de management du dossier de fabrication. Ce plan de gestion de la qualité présente aussi les démarches entreprises en terme de qualification du produit et de mise en place des procédures de retour d'expérience. Les calendriers de fabrication et les organigrammes de gestion de projet au cours du temps sont enfin présentés.

L'assurance qualité :

La norme ISO 9000-2000 définit les exigences requises en matière de qualité. Elle spécifie les exigences relatives à un système de management de la qualité pour tout organisme qui doit démontrer son aptitude à fournir régulièrement un produit conforme aux exigences de son client.

La norme ISO 14000, traite du « management environnemental ». Il s'agit de ce que fait l'organisation pour réduire les effets nuisibles de ses activités sur l'environnement. Son respect, par le soumissionnaire est un plus apprécié au moment de la sélection.

Il a été demandé à la société sous-traitante le respect de certains points essentiels de ces normes. En particulier, le sous-traitant a dû fournir un manuel présentant ses engagements et sa politique en terme de qualité où sont définis les responsabilités de chaque service ainsi que les moyens, personnels et procédures nécessaires à la réalisation et au test de nos cartes. Chaque carte doit être identifiée avec son numéro de série et accompagnée d'une fiche individuelle de fabrication (numéro compris entre 100 à 1930, étiqueté sur la carte et enregistré dans un PLD). Le sous-traitant doit fournir un numéro d'ordre de fabrication pour chaque série (traçabilité, suivi des lots de composants, date de réalisation, informations générales sur la fabrication). Il doit aussi préciser sur la fiche de suivi de fabrication, le nom du vérificateur et les commentaires après contrôles. 100% des problèmes doivent être pris en considération. Les indicateurs généraux de non qualité doivent être communiqués (information permanente sur les performances). Le sous-traitant doit vérifier complètement les documents et fichiers de fabrication avant le lancement de la fabrication (Implantation des composants, empreintes, spécifications de fabrication...). Certaines informations utiles sont ajoutées par le soumissionnaire dans son plan de management de la qualité pour la production de nos cartes.

Les critères d'acceptation des cartes (fixés en accord avec la société sous-traitante) :

Le nombre de corrections (manuelles) acceptables, tant au niveau des soudures qu'au niveau des composants, fait l'objet d'une approbation préalable qui tient compte de la qualité et de la fiabilité requise. Toutes les actions de réparations manuelles sont détaillées dans le tableau de compte rendu de la production de chaque série fourni par le sous-traitant. On autorise au maximum 4 changements de composants sur une même carte, exception faite pour les petits Composants Montés en Surface (CMS). La série livrée doit être complète pour paiement. 100% des cartes doivent être réputées bonnes (Le test fonctionnel doit être sans erreur et la carte ne doit pas être dégradée mécaniquement, d'un point de vue du circuit imprimé ou des composants). Un contrôle visuel de qualité est réalisé sur les produits finis (emballages inclus). Le contrôle de la qualité de la tropicalisation de la carte est réalisé par lampe à UV : si son aspect n'est pas convenable, la tropicalisation doit être renouvelée totalement.

L'emballage des cartes doit assurer leur protection mécanique, contre l'humidité et les décharges électrostatiques. Elles sont stockées sur des palettes dans des cartons à croisillons contenant 18 cartes emballées individuellement dans des sachets anti-statiques lisses pour ne pas occasionner de traces sur le vernis de tropicalisation. Ce sachet est ensuite inséré dans une pochette anti-statique à bulles accompagnée de dessicant pour la protection contre l'humidité. Le transport jusqu'en Argentine est pris en charge par la cellule logistique du CNRS. Une inscription collée sur les emballages indique le type et la fragilité du contenu à l'attention des services de douanes pour prévenir toute dégradation lors des contrôles.

En cas de produit non conforme, le soumissionnaire garde la maîtrise des corrections à apporter. En cas de défaillance d'une carte, non résolue par un contrôle visuel, un test in situ ou fonctionnel, des sessions de diagnostic et de dépannage sont organisées conjointement entre notre laboratoire et le soumissionnaire sur le site de production des cartes.

6.4. Le marché public

La fabrication des cartes unifiées comprend plusieurs prestations qui doivent être réalisées par l'entreprise chargée de la production. Le nombre de cartes à réaliser est de 1830. La prestation comprend l'approvisionnement d'une partie définie des composants, la réalisation du circuit imprimé, le câblage et les programmations de certains composants. Elle comprend enfin les tests de fabrication et les tests fonctionnels, le déverminage des cartes, leur tropicalisation et le conditionnement des produits finis. Certains composants sont approvisionnés par notre

laboratoire séparément de cette prestation demandée pour des raisons de coût ou de difficultés d'approvisionnement (obsolescence).

Le coût estimé de la prestation étant supérieur à 800 000 Francs, un appel d'offre restreint Européen a dû être lancé pour la fabrication des 1830 cartes unifiées (1600 cartes, plus 230 de rechange). J'ai été en charge de la réalisation et du suivi de cette procédure.

6.4.1 Les étapes de l'appel d'offre restreint

Un appel d'offre restreint signifie qu'une présélection des entreprises admises à proposer une offre est d'abord réalisée.

La première étape consiste à publier un avis de pré information au journal officiel en début d'année. Le lancement de la procédure est initié par la publication d'une annonce d'appel d'offre au B.O.A.M.P. (Bulletin Officiel d'Annonce des Marchés Publics de la République Française) et au J.O.C.E. (Journal Officiel de la Communauté Européenne). La date limite de réception des candidatures est fixée à au moins 40 jours après l'émission de l'annonce. Après cette échéance, une commission de sélection est organisée : Sont admises à proposer une offre, les entreprises étant en règle avec l'administration fiscale, présentant une expérience suffisante dans le domaine de réalisation, ayant une certification qualité de type ISO 9000-2000 et des garanties financières suffisantes. Les documents contractuels de description de la prestation (C.C.A.P., C.C.T.P., RDC...) sont ensuite envoyés aux candidats retenus.

Après un délai d'au minimum 40 jours, une commission de sélection est à nouveau réunie pour choisir la meilleure offre, c'est-à-dire l'entreprise retenue pour réaliser la prestation (au « mieux disant » selon des critères définis par le demandeur, comme par exemple la valeur technique de l'offre, les moyens, les coûts, les délais, la garantie...).

Les commissions de sélection sont constituées de membres du laboratoire demandeur dont un représentant du directeur, de responsables du bureau des marchés et de l'agence comptable de l'institut du laboratoire demandeur et d'une personne de la direction de la concurrence et de la répression des fraudes.

La dernière étape consiste à rédiger le rapport de présentation à destination du contrôleur financier du ministère des finances, chargé de valider la procédure. Dès lors que le candidat a fait une proposition, celle-ci est ferme, et son prix ne peut évoluer qu'en fonction de l'indice du coût horaire et des produits et services fournis par le bulletin officiel. Le candidat est obligé par son offre.

6.4.2 Les documents contractuels

Lors de la réalisation d'un appel d'offre, un ensemble de documents doit être rédigé afin de décrire la prestation demandée. Ces documents sont le support indispensable de l'appel d'offre, et au-delà, ils restent nécessaires au management du marché de production (car ils décrivent les limites techniques du contrat, les conditions de paiement, les délais...). La qualité de leur rédaction est importante pour la réalisation de la prestation et permet aussi d'éveiller l'intérêt des entreprises.

Le marché public est soumis aux dispositions du Code des Marchés Publics. Il est constitué par les documents contractuels énumérés ci-dessous par ordre de priorité décroissante :

- L'acte d'Engagement et ses bordereaux de prix
- Le Cahier des Clauses Administratives Particulières et son bordereau de délais
- Le Cahier des Clauses Techniques Particulières
- Le Cahier des Clauses Administratives Générales applicables aux Marchés Publics Industriels (CCAGMI) - Décret n° 80-809 du 14 octobre 1980 et ses modifications ;
- La Proposition du Titulaire.

Le Cahier des Clauses Techniques Particulières (C.C.T.P.)

C'est un cahier des charges qui indique et décrit les prestations à réaliser et les spécifications techniques particulières. Il décrit l'environnement d'installation du produit ainsi que les limites techniques. Il souligne les exigences en terme d'assurance qualité, la fiabilité et la garantie minimale requise (20 ans de fonctionnement, 2 ans de garantie). Les quantités par série et par tranche, la manière de présenter la réponse à l'appel d'offre (pour faciliter la sélection) et les contacts techniques dans notre laboratoire sont enfin précisés.

Le Cahier des Clauses Administratives Particulières (C.C.A.P.)

Le C.C.A.P. rappelle les documents contractuels et indique les limites du contrat et les prestations à réaliser. Il précise les règles concernant la sous-traitance d'une partie du marché (le choix des sous-traitants par le prestataire est soumis à accord de l'administration). Ce document contractuel décrit la formule de révision des prix en fonction de l'indice d'évolution du coût horaire et des produits et services. Il impose aussi les caractéristiques de l'emballage des produits finis (protection du matériel durant le transport jusqu'en Argentine). Il décrit de plus les modalités de vérification et les conditions d'acceptation des cartes. La garantie minimale requise, le cadre juridique et la gestion des litiges (les tribunaux

administratifs sont seuls compétents pour régler les litiges), ainsi que les modalités de paiement de la prestation par l'administration sont précisés. Les quantités et les délais maxima pour chaque tranche de production ainsi que la méthode de calcul des pénalités de retard en cas de dépassement des délais sont énumérés. Il indique enfin les modalités et délais maxima de lancement de chaque série ou tranche.

Le Règlement de Consultation (R.D.C.)

Ce document précise les modalités de la consultation, il n'est pas contractuel.

Il décrit la procédure d'appel d'offre, précise les documents à compléter et la manière dont doit être présentée la réponse. La date limite d'envoi de l'offre et son délai de validité y sont aussi indiqués. Il définit les critères d'attribution du marché de fabrication par ordre décroissant d'importance (fixés par le demandeur en accord avec l'article 53 du code des marchés).

Le bordereau de prix est un tableau où les candidats doivent reporter le détail des prix de leur offre. Il permet de détailler chaque prestation, série, tranche et options pour faciliter la sélection. Il aide aussi à déceler des incohérences dans l'offre du candidat (prix anormalement bas, offre incomplète...).

L'offre du candidat

Le candidat doit fournir, annexé à son offre, un document de description détaillée de la prestation qu'il propose (Choix techniques, méthodes de fabrication, moyens utilisés, assurance qualité, moyens de test, tropicalisation...).

Le rapport de présentation décrit le déroulement de la procédure, le contexte de la réalisation et les règles du marché. Il résume toutes les offres et indique un classement en mentionnant les raisons du rejet de certaines offres et présente la société retenue.

Les avenants

Durant la réalisation du marché, la prestation peut être complétée ou modifiée. Si le coût de l'opération n'est pas trop important (inférieur à 5% du prix total), un avenant au marché doit alors être réalisé et soumis à l'accord du contrôleur financier. L'avenant accompagné d'un rapport de présentation, décrit les travaux supplémentaires à réaliser ou les modalités de modification d'une prestation, précise les coûts relatifs fournis par le soumissionnaire et le contexte de la demande. Sa réalisation est soumise au visa du contrôleur financier. Nous

avons déjà réalisé trois avenants en les rédigeant en collaboration avec les services administratifs de l'IN2P3 pour des travaux supplémentaires et approvisionnements anticipés.

6.4.3 Compte rendu de l'appel d'offre

Suite à la parution de l'avis d'appel public à la concurrence, il a été reçu **15 dossiers de candidature**. A l'issue des réunions des 15 mars et 8 avril 2002, **8 candidats ont été retenus**, dont **6 sociétés** qui ont fait parvenir une **offre**. Le titulaire choisi (le 4 septembre 2002) est la **société LST Electronique S.A.S.** située à Aurec sur Loire (43). Cette société était la mieux disante. D'une part son offre était la moins chère, et les méthodes de test de fabrication proposées ainsi que l'organisation de l'outil de production semblaient les meilleurs. La société emploie 180 employés dont 50 sur le site de production d'Yssingaux. Elle réalise de nombreuses sous-traitances dans des domaines variés (militaire, médical, maritime, sécurité, informatique, terminaux de paiement, recherche scientifique). L'offre proposée par LST est meilleure que nos estimations. La garantie proposée par LST est de 2 ans. Le coût de la prestation est d'environ 450 000 Euros pour 1830 cartes fabriquées. En ajoutant les composants que nous avons achetés séparément, la fabrication d'un ASIC, les frais divers et les éventuelles évolutions de prix, le coût global est proche de 835 000 Euros, soit 455 Euros par carte. Un détail des coûts est présenté en annexes V.

6.5. Fabrication et gestion de production

6.5.1. Le site de production



La production des cartes est réalisée sur le site d'Yssingaux de la société LST. La chaîne de fabrication est constituée de 2 chaînes d'assemblage CMS d'une capacité de 4000 composants par heure (2 machines de sérigraphie semi-automatique avec système de vision et 2 chaînes de montage CMS automatiques, 1 four à convection forcée et 1 four de refusion).

Photo 15 : Site de production d'Yssingaux

Pour les composants traversant, ce site est équipé d'une machine de montage de composants traversants, d'une machine de soudure à la vague et d'une machine de lavage des cartes. Une enceinte thermique permet le séchage des cartes.

Pour le déverminage des cartes, il y a une enceinte climatique (température variable de -70 à +80 °C avec une pente maximale de 5 °C/mn et l'humidité est ajustable de 3 à 98 %).

Le test de fabrication ou test in situ des cartes peut être réalisé par un testeur "TERRADYNE ZI880" ou un Marconi qui sont des testeurs de type "Planche à clous".



Photo 16 : assemblage manuel



Photo 17 : Soudure à la vague

Le site de production est équipé d'un poste de maintenance doté d'oscilloscopes numériques à mémoire, de multimètres, de générateurs de signaux programmables, de programmeurs d'EEPROM et d'autres matériels de diagnostic et de réparation. Plusieurs postes de travail sont dédiés aux bancs de test fonctionnel, 15 postes sont dédiés à l'assemblage manuel, et plusieurs autres postes dans des zones délimitées de l'usine sont dédiés à l'insertion manuelle des composants traversant ou à l'intégration d'équipements électroniques. La tropicalisation des cartes est réalisée dans un local séparé équipé aux normes en vigueur. Ce site de production est très bien organisé, en regard de la très bonne gestion de l'espace et des flux malgré sa taille modeste de seulement 1000 mètres carrés. Les cartes passent en premier par la zone CMS. Elles sont ensuite envoyées à la zone d'insertion et de soudure à la vague, pour terminer dans les zones d'assemblage manuel, de test puis d'intégration. Il n'y a pratiquement jamais de croisements des cartes sur la chaîne de production. L'utilisation de convoyeurs spécifiques, en particulier pour la chaîne de soudure à la vague permet une gestion efficace de l'espace. Les cartes en cours de production sont stockées dans des caisses et accompagnées de fiches de suivi pour identifier les étapes déjà réalisées et les remarques sur les étapes passées. La très bonne qualité de la chaîne, des méthodes de production et de l'organisation du site a influencé notre choix lors de la sélection de l'entreprise pour la fabrication des cartes.



Photo 18 : Chaîne automatique de montage CMS



Photo 19 : Testeur in situ

6.5.2. Le dossier de fabrication

Introduction :

La fabrication d'une carte électronique « complexe » avec une qualité maximale et une fiabilité optimale du produit fini, nécessite la mise en place d'une gestion de production efficace. En particulier, toutes les spécifications et les demandes doivent être prises en compte et les modifications doivent être parfaitement gérées. L'ensemble de ces spécifications réalisées par le client, permettent la création du dossier de fabrication standardisé par le service des méthodes de la société LST dont la présentation permet la familiarisation rapide des opérateurs : les schémas d'implantation sont par exemple coloriés avec différentes couleurs pour une vision immédiate des composants à planter ou de points de contrôles précis.

Le répertoire document:

Afin de travailler avec les bonnes versions de fichiers ou de documents, toutes les données utiles à la fabrication de notre carte sont répertoriées dans un fichier appelé « Répertoire documents » qui utilise une procédure standard définie par notre sous-traitant. Chaque fois qu'un document est modifié, son indice, ainsi que celui du répertoire document sont incrémentés. Des alarmes sont activées dans la base de données du sous-traitant pour indiquer toute incrémentation d'indice et éviter l'utilisation de fichiers dont la version n'est pas conforme avec celle définie dans le répertoire document.

Les changements d'indice de documents et donc du répertoire document sont approuvés par accusé de « réception » (par courrier électronique) de chaque partie (Nous et LST). A chaque

modification d'un document, sa nouvelle version correctement indiquée, accompagnée du répertoire document modifié et re-indicé est transmise à LST. Ainsi les deux partis travaillent avec les mêmes versions de documents.

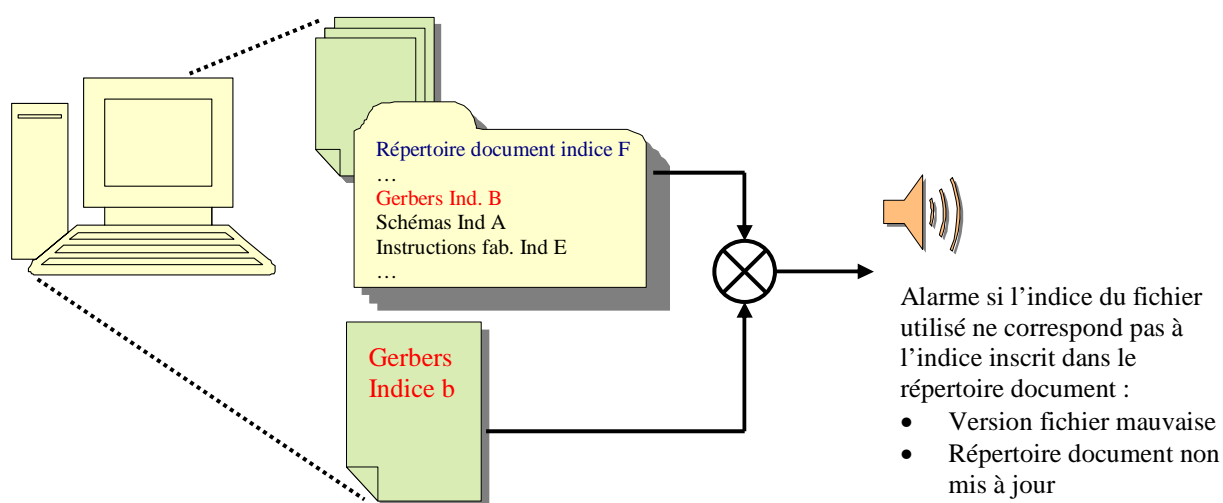


Figure 29 : Contrôle automatique de l'indice des fichiers avec le répertoire document

Le suivi des modifications:

En accord avec notre plan de gestion de la qualité, en accompagnement ou à la fin de chaque document ou fichier, un tableau présente l'historique des ajouts et modifications. Des couleurs sont utilisées dans le tableau et dans le texte du document pour souligner les derniers changements.

Date	Indice	Commentaire	Auteur
18/12/2002	A	Création du document	S.Colonges
06/01/2003	B	Ordre de l'opération de tropicalisation Les verrous des connecteurs SUBD ne seront pas montés	
05/03/2003	C	Correction du document	S.Colonges
30/07/2003	D	Ajout d'informations pour la tropicalisation Ajout d'informations diverses sur le composant ASIC Ajout d'informations sur les critères d'acceptation des cartes (paragraphe qualité)	S.Colonges
08/10/2003	E	Ajout d'instructions d'emballage et d'instruction de montage (connecteurs, PU1 et PU2)	S.Colonges

Figure 30 : Exemple de suivi de modifications dans un document

Au début de chaque document, un tableau indique les dates des dernières modifications, les auteurs et le nom des personnes ayant vérifié la version en cours (voir tableau 4).

N°	WRITTEN		VERIFIED		APPROVED	
	By	date	By	Date	By	Date
A	S.Colonges	18/12/02				
B	S.Colonges	06/01/03	B.Courty	05/02/03	JM.Brunet	05/02/03
C	S.Colonges	05/02/03	B.Courty	05/02/03	JM.Brunet	05/02/03
D	S.Colonges	30/07/03	B.Courty	30/07/03	JM.Brunet	31/07/03
E	S.Colonges	08/10/03	B.Courty	08/10/03	JM.Brunet	20/10/03

Tableau 4 : Tableau d'entête de vérification et d'approbation d'un document

RÉPERTOIRE DOCUMENT			
DÉSIGNATION :	Carte AUGER - IN2P3 ("carte unifiée")		
INDICE :	K		
Date de mise a jour :	08/10/03		
réf. du sous document	Indice	Désignation du sous document	Nombre de folios / remarques
NomAuger04072003 (document Excel)	G	Nomenclature carte unifiée AUGER	Nomenclature des composants
Bill of matériel (document .txt)	A	Version 1.3 ==> repères topologiques	Intégrée et mise a jour dans la nomenclature de la carte unifiée AUGER (version obsolète)
Fabrication Instructions (document Word)	E	Instructions de fabrication de la carte unifiée	Instructions générales de fabrication : en particulier, instructions de câblage, instructions de tropicalisation, instructions d'emballage ...
Instructions de programmation (document Word)	D	Instructions de programmation	Instructions logiciel
specificationgenerales (document Word)	B	Spécifications générales : compte rendu de la réunion du 24/10/2002	Spécifications générales (réunion du 24/10/2002)
testfonctionnelub (document Word)	C	Procédure de test fonctionnel	Description du test fonctionnel
deverminagespecifications (document Word)	E	Procédure de deverminage	Description de la procédure
Schéma électronique	C	Relatif aux fichiers de fabrication Unified Board version 1.4 schemaUB1V4.tgz	Cette version inclue les pages de test
PLD.pdf	A	Schema interne du PLD	
Fichiers gerbers : Gerber21.tgz Incluent en particulier : plan de routage plan de sérigraphie Masque de vernis épargne Masque de refusion (PASTEMASK_TOP2.1.art) plan de perçage plan d'implantation TOP et BOTTOM	F	Fichiers gerbers du CI version 2.1 (Gerber étendu RS274-X) TOP.art modifié entre indice D et E SERI_TOP.art modifié entre indice D et E VE_TOP.art modifié entre indice D et E (Masque de refusion modifié entre versions D et E. M44 enlevé car non soudé) Non modifié entre version D et E	Fichiers Gerbers 4 couches : routage Top et Bottom et plan internes Sérigraphie top et bottom Verni épargne top et bottom Masque de refusion pour la soudure des composants CMS
SpecificationsCI	B	Spécifications pour la réalisation du circuit imprimé	Spécifications particulières pour le circuit imprimé
extract20.val.gz	B	Fichier Fabmaster pour UB version 2.0	Fichier Fabmaster (pour test in-situ) relatif aux fichiers gerbers version 2.0 pour la fabrication de la carte
QMPunifiedboardproduction	0	Plan de management qualité pour la production de la carte unifiée (Unified Board)	Document rédigée en Anglais dans le cadre de la collaboration scientifique de l'expérience Auger - Fourni pour information
Instruction specifiques TIS	B	Instruction specifiques pour le test in situ	Instructions spécifiques concernant la preparation de l'outillage de test in situ et sa programmation
Flash.zip	C	Programme a charger dans la memoire Flash EPROM AMD pour la série B	Programme a charger dans la Flash (série B), version du 15/07/2003
Outil de programmation fourni et mis à jour par l'IN2P3	B	Code a charger dans les PLD et ensemble de programmation (livraison fin juillet 2003 pour futures séries)	Outil de programmation avec logiciel (voir les instructions de programmation)
prom.bin	A	Programme pour la PROM	Programme a charger dans la memoire Eprom 27LV010 OTP

Figure 31 : Extrait du répertoire document

6.5.3. La fabrication

Afin d'atteindre la qualité requise pour le produit, l'organigramme de la fabrication a été défini par LST en fonction de nos contraintes. En raison de notre préoccupation pour la fiabilité, nous avons particulièrement travaillé sur la définition des moyens de test. En plus des contrôles visuels deux tests complémentaires importants sont réalisés :

- **Le test de fabrication (Test in situ ou « TIS »)** qui permet le contrôle sur la **carte** de l'absence de courts circuits et de mauvaises soudures (test réalisé à l'aide de sondes conductrices ou de sondes capacitives pour les gros composants). Il vérifie le sens de montage des composants, et réalise le test fonctionnel de certains d'entre eux. Si aucun défaut n'est détecté, une petite marque est réalisée automatiquement sur la carte testée par un outil monté sur le testeur. Les deux principaux types de testeurs généralement utilisés sont ceux à sonde mobile ou ceux à « planche à clous ». Ce second type, choisi pour notre carte, est un test de fabrication rapide présentant un taux de couverture supérieur à 80%. 470 points test ont été ajoutés pendant la conception à cet effet au verso de la carte. Seule la première série a été testée avec un testeur à sonde mobile (moins rapide et avec une couverture plus faible) dans l'attente de la réalisation de l'outillage pour le test « planche à clous ».

- **Le banc de test fonctionnel** qui a été développé par le Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire d'Orsay. Cet équipement est de type GO/NO GO (i.e. « C'est bon, ou ce n'est pas bon »), il permet de valider le bon fonctionnement de la carte. Le chapitre 7 de ce mémoire est consacré à la description de cet équipement.

Les tests de fabrication et fonctionnel sont complémentaires. De plus un test fonctionnel minimum est réalisé durant le déverminage (cycles en température) des cartes, et apporte des informations supplémentaires. Certains défauts ne peuvent être immédiatement détectés que par le « TIS » (court-circuit, carte hors service...). En revanche, certains défauts liés au fonctionnement du système ne peuvent être détectés que par le banc de test fonctionnel (mauvais fonctionnement du composant time tagging, mauvaise fréquence d'horloge...). On utilise aussi conjointement le « TIS » et le banc test fonctionnel pour l'analyse des défaillances et la calibration mutuelle des deux types de testeurs afin d'améliorer leur couverture individuelle. Pour un échantillon de cartes (15%), un second test in situ (« TIS ») est réalisé pour détecter d'éventuels problèmes intervenus durant le déverminage et qui ne pourraient être observés au test fonctionnel. Ce test, réalisé prioritairement sur les cartes ayant présenté un dysfonctionnement durant les cycles en température, aide aussi à l'amélioration de la couverture de notre banc de test fonctionnel par la recherche de la méthode de détection de

ces défauts à l'aide de ce banc. Il est aussi utile pour calibrer plus finement le déverminage. Un deuxième test fonctionnel est réalisé après tropicalisation pour un échantillonnage de carte (15%) pour vérifier que cette opération n'en a pas altéré le fonctionnement (vernis dans les connecteurs...). Ces tests supplémentaires sont très utiles pour contrôler les cartes douteuses.

L'organigramme de fabrication :

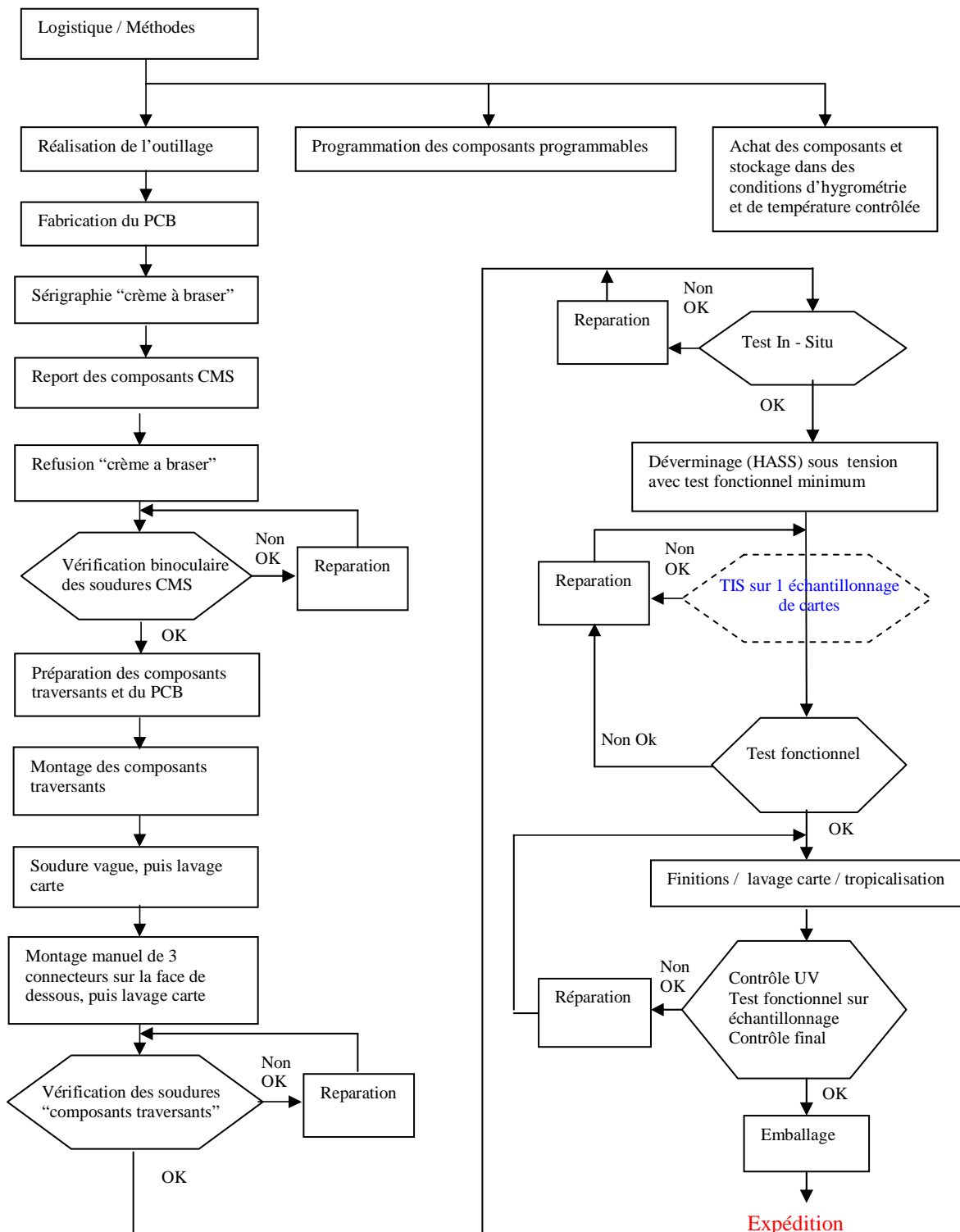


Figure 32 : l'organigramme de fabrication

6.5.4. L'analyse des résultats de la production

La fabrication des 10 premiers prototypes industriels au mois d'Avril 2003 et la phase de pré production de 120 cartes au mois de juillet 2003, puis de production de 303 cartes en janvier 2004 ont permis la mise au point des équipements de test et des procédures de production. De plus les résultats de ces productions ont été analysés afin de réaliser les corrections nécessaires des fichiers et procédures de fabrication. Une note d'avancement (Gap note) a été rédigée et publiée à l'attention de la collaboration. La qualité des cartes produites est très satisfaisante, une seule carte a été rejetée suite à une mauvaise qualité du circuit imprimé et une deuxième s'est révélée non fonctionnelle. Cette analyse a permis de :

- Résoudre un problème dans la programmation des mémoires Flash
- Relever une mauvaise qualité de tropicalisation et mettre en œuvre des solutions efficaces
- Corriger des empreintes de composants pour améliorer la fiabilité
- Adapter les procédures de fabrication ou corriger des outillages de production

Toutes les reprises manuelles sont notées (conséquences éventuelles sur la fiabilité). Après chaque série de production, une même analyse doit être réalisée afin de corriger les problèmes. Par exemple, le lavage des cartes engendre de l'humidité dans les modules convertisseurs DC/DC. Nous étudions des solutions pour protéger ces modules.

Les résultats de la production des cartes sont présentés par LST dans un tableau. Les colonnes correspondent aux numéros des cartes. Les lignes correspondent à chaque étape de la production (pose CMS, inspection visuelle, insertion composants, soudure vague, programmation, déverminage, TIS, test fonctionnel...). Ainsi les problèmes rencontrés et les remarques sont notés pour chaque carte unifiée à toutes les étapes de la production. Cette fiche de suivi permet dans certains cas de déterminer plus rapidement les causes des défaillances et contrôler des cartes similaires (cas de reprises manuelles...). Les cartes ayant subi des reprises manuelles importantes, ou ayant présenté des dysfonctionnements non expliqués durant le déverminage ont une fiabilité potentiellement réduite. On les placera préférentiellement à des endroits facilement accessibles dans le champ d'expérience.

6.5.5. Le management de la fabrication au cours du temps

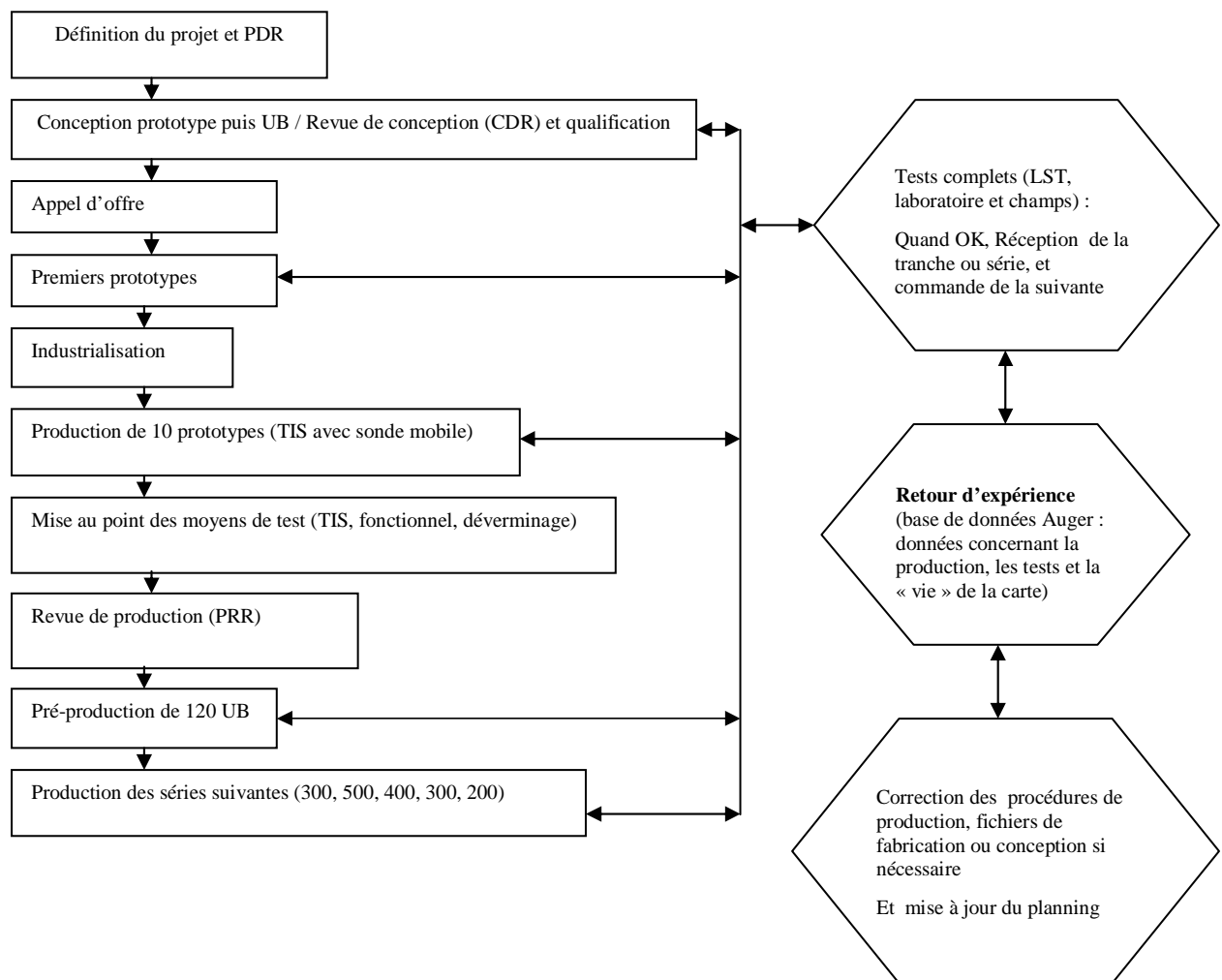


Figure 33 : le management de la fabrication

Outre l'établissement d'un planning sérieux, les opérations à chaque étape du projet et les actions associées doivent être définies et présentées sous forme d'un chronogramme (figure 33). Toutes les étapes y sont décrites : conception, industrialisation, production, installation, retour d'expérience et maintenance...

6.6. Conclusion

En raison de la taille de l'observatoire et le besoin d'une excellente fiabilité, le suivi de production et la mise en place de procédures de qualité efficaces sont essentiels à la gestion de ce projet. L'expertise acquise dans ce domaine est riche et peut être partagée avec d'autres expériences. Elle sera sans aucun doute très utile pour la réalisation prochaine du site nord de l'observatoire Pierre Auger.

7. Le banc de test fonctionnel

Un banc de test des cartes unifiées (UB) a été conçu en collaboration avec le laboratoire du LAL d'Orsay. Il est constitué par un ordinateur fonctionnant avec un système d'exploitation « Linux », d'un ensemble électronique d'interfaçage avec la carte à tester (pour le test de toutes ses entrées et sorties) et d'une partie mécanique permettant l'interconnexion rapide de tous les connecteurs de cette carte à tester à l'ensemble électronique d'interfaçage. Des cartes filles dont une permettant l'émulation du Front End et un module GPS sont montés sur le châssis mécanique. La carte à tester est alimentée par une source contrôlée par le boîtier électronique en tension de 0 à 30 Volts et en limitation de courant jusqu'à 5 Ampères. Le programme de test automatique se présente sous forme de fenêtres graphiques (développé avec l'outil Glade et en langage C fonctionnant sous Linux Red Hat). Un accès matériel au réseau Internet fourni par LST permet le transfert des données recueillies durant ce test vers notre base de données centralisée. La communication entre le banc et la carte à tester est réalisée par port série. 3 exemplaires de ce banc test ont été construits et installés sur le site de production, à Malargüe, et au LAL d'Orsay.

Le test fonctionnel est réalisé en conditions de température ambiante. Il dure environ 3 minutes. La carte est installée sur la partie mécanique du banc test (ce temps d'installation est inférieur à 30 secondes). Le test est lancé et est réalisé automatiquement à l'aide du logiciel dédié. La formation des techniciens de la société LST à l'utilisation de ce banc a été assurée par notre équipe. Ce matériel, son logiciel ainsi que la procédure d'utilisation sont régulièrement adaptés pour tenir compte des remarques de la société LST et des utilisateurs. Ce banc permet de tester le fonctionnement intégral des cartes ou de leurs fonctions : les lignes de signaux (CNA/CAN, voies RS232, DMA, chip select, 1PPS ...), ainsi que les mémoires RAM et Flash, la fonction « TPS », les alimentations, le marquage en temps et les horloges. Pour les voies de Slow Control (CNA/CAN), on vérifie que la précision des voies est comprise dans une gamme souhaitée. Les fonctions de test sont chargées dans la mémoire des cartes unifiées. Elles sont exécutées séquentiellement, et dans certains cas, plusieurs fonctions sont testées en même temps. L'ordinateur envoie des commandes avec des paramètres appropriés à la carte testée et récolte ses réponses.

Lors de chaque test, une fiche est créée ou mise à jour pour chaque carte dans la base de données. Elle contient notamment :

- L'identificateur de l'UB (ID)
- Le nom de l'opérateur et le site où est réalisée l'opération (LST, CDF, Malargüe, ...)
- La date
- La nature de l'opération (premier test, réparation...)
- Statut après test (OK, numéro de l'erreur)
- Si le Statut n'est pas OK :
 - Type de panne
 - Description détaillée de l'erreur
 - Partie de la carte et composants concernés
 - Remarques et description du problème
- Si Statut OK :
 - Description détaillée de la réparation (si réparation)
 - Temps passé
 - Coût et composants utilisés (éventuellement)
- Informations particulières du fabricant (numéro d'Ordre de Fabrication, informations générales sur la fabrication, numéros de série des circuits, reprises manuelles ...)

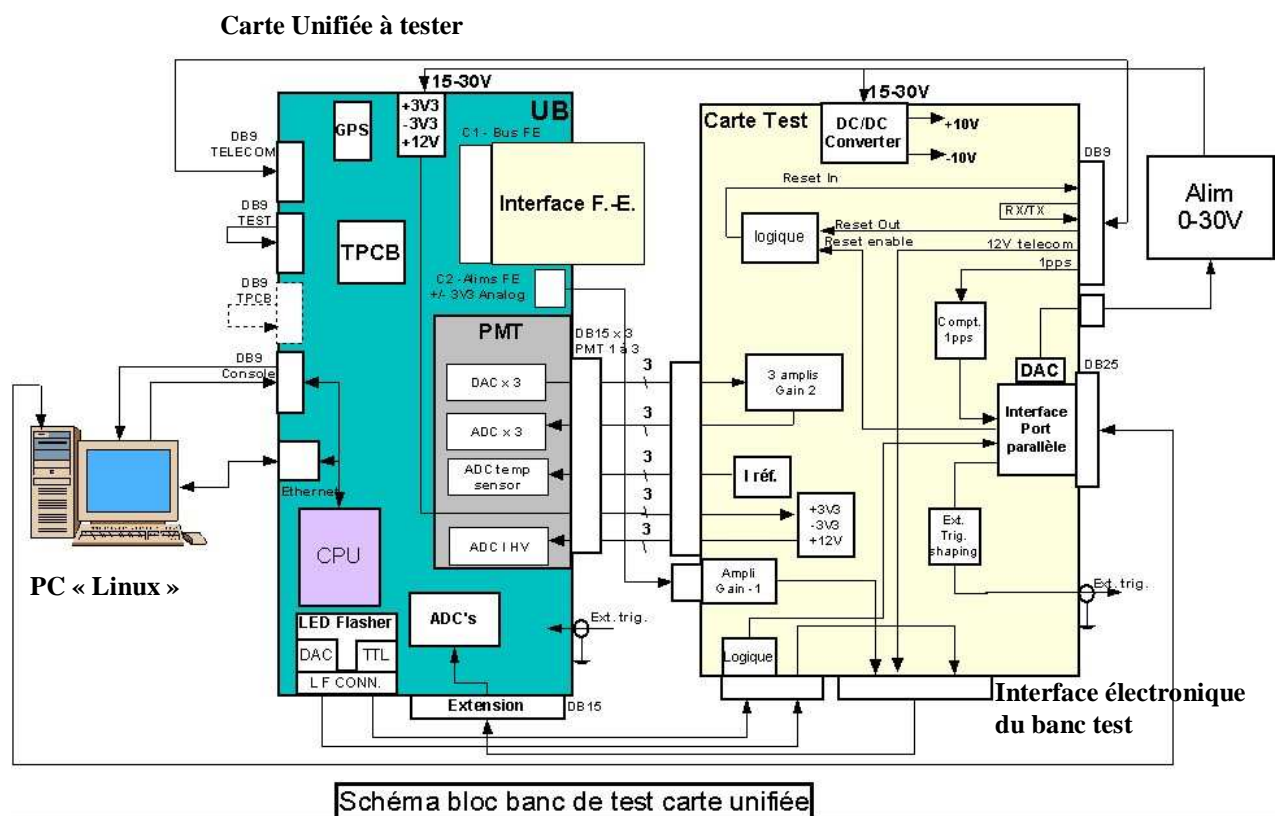


Figure 34 : Schéma bloc du banc de test fonctionnel

Photos du banc de test fonctionnel et description de la mise en place de la carte à tester :

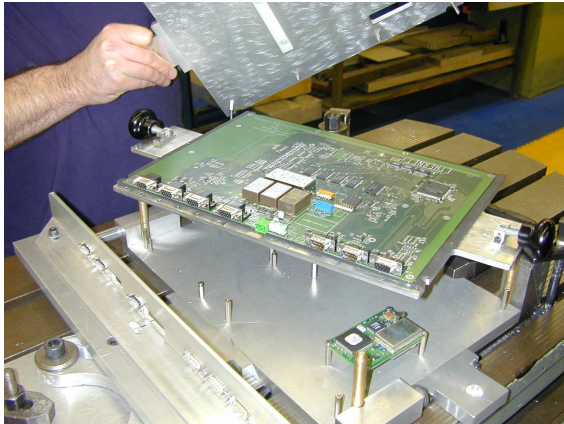


Photo 20 : installation carte

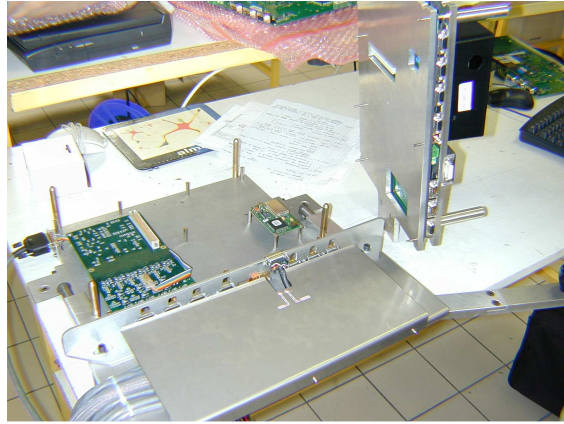


Photo 21 : Partie amovible et réceptacle



Photo 22 : vue générale du banc test

Façade avant et levier

Procédure de montage :

- Installer la carte dans son réceptacle amovible et bloquer la partie supérieure à l'aide des 2 poignées latérales noires (photo 20)
- Installer la partie amovible sur le châssis (photo 21)
- Enficher la façade avant (connecteurs) à l'aide du levier mécanique (photo 22)

8. La procédure de déverminage

8.1 Introduction

Pour fabriquer un produit fiable, il faut avant tout, éliminer les défauts de jeunesse (soudures défaillantes, points faibles ...) en réalisant un déverminage adapté (Comme préconisé dans l'étude de la fiabilité de la carte unifiée, chapitre 5). Cette procédure vise à éliminer ces défauts en réalisant un vieillissement initial accéléré (cycles en température) et en appliquant des stress supérieurs (mise en et hors tension à chaud et à froid) aux conditions normales de fonctionnement des cartes manufacturées, en veillant toutefois à ne pas altérer leur durée de vie. Un test fonctionnel minimal permet de suivre en temps réel l'apparition des défauts. J'ai été chargé de la mise en oeuvre de la procédure de déverminage et de la conception matérielle et en partie du logicielle du banc dédié. Nous avons formé un technicien de l'entreprise LST à l'utilisation du logiciel de contrôle du déverminage et au branchement de l'ensemble des équipements.

8.2 Le banc de déverminage

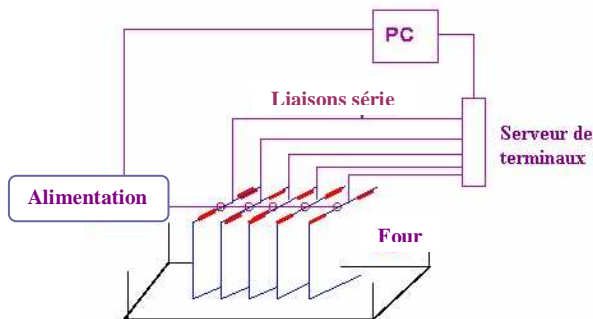


Figure 35 : Schéma de principe du banc de déverminage

Les cartes sont placées dans une enceinte climatique du site de production d'Yssingaux contrôlée par un ordinateur dédié. Elles sont « brûlées » durant plusieurs heures (vieillissement initial), puis contraintes thermiquement par plusieurs cycles en température. Durant le déverminage, les cartes sont alimentées (tension réglable de 0 à 30 VCC) et un test fonctionnel minimal est réalisé. De plus, les cartes sont soumises à des contraintes électriques en réalisant leur mise hors et sous tension à chaud et à froid. A cet effet, un second ordinateur permet contrôle l'alimentation des cartes et le suivi de leur test via un boîtier électronique

spécifiquement conçu. Une connexion matérielle au réseau Internet permet de transférer les données de l'ordinateur vers notre base de donnée centralisée.

8.2.1. La connexion des cartes

La réalisation d'un test fonctionnel durant le déverminage doit permettre de détecter le moment où interviennent les défaillances durant les cycles en température afin de les analyser et d'augmenter la durée de la procédure de déverminage si elle n'est pas suffisante ou la diminuer si aucun défaut n'intervient durant les derniers cycles. Ces résultats sont indicatifs. Ce test ne doit pas engendrer d'opérations complémentaires durant la production. L'installation des cartes dans l'enceinte est réalisée à l'aide de deux étagères d'accueil des cartes (racks) de 10 emplacements dotées d'une porte frontale ajourée permettant l'accès aux connecteurs des cartes et leur blocage. La communication avec les 20 cartes est réalisée par des liaisons série via des serveurs de terminaux connectés à l'ordinateur par une liaison Ethernet. Les entrées et sorties du slow control sont rebouclées entre elles pour être testées. Les connecteurs pour chaque carte sont montés sur deux poignées mécaniques afin de permettre une interconnexion rapide. La commande du module d'alimentation des 20 cartes est réalisée par l'intermédiaire d'un boîtier de contrôle du déverminage spécialement conçu. Le développement de l'outillage de déverminage a été réalisé dans un souci permanent d'ergonomie et de productivité pour l'opérateur.

8.2.2. Le boîtier électronique de contrôle du déverminage ou « Powerbox »

Ce boîtier électronique permet :

- Le contrôle de l'alimentation des cartes (commande et mesure de la tension et du courant)
- La mesure de la température dans le four (permet de suivre le déroulement du déverminage pour programmer des mises sous et hors tension à chaud et à froid : stress électrique)
- Le déclenchement d'une alarme en cas de défaut (absence de signal provenant du PC)
- Surveiller l'état du système (Cartes sous tension, en service ou défaut)

Il est contrôlé par l'ordinateur Linux via son port parallèle. L'interface avec le port parallèle de l'ordinateur est réalisée à l'aide d'une interface dite « **EPP** » (**E**xtended **P**arallel **P**ort) conçue autour d'un FPGA Altera par nos collègues du LAL pour le banc de test fonctionnel. Cette interface multiplexe le bus de 8 bits du port parallèle afin d'obtenir un bus de 32 bits bidirectionnel utilisé par l'électronique de contrôle du déverminage pour la communication du boîtier électronique avec le PC. Une librairie spécifique (libppint.so) développée sous linux permet la gestion du protocole de communication (EPP parport).

Le contrôle de l'alimentation des cartes est réalisé par un convertisseur numérique analogique (CNA) de 8 bits avec 2 sorties analogiques de 0 à 5 Volts continu (contrôle de la tension et de la limitation en courant).

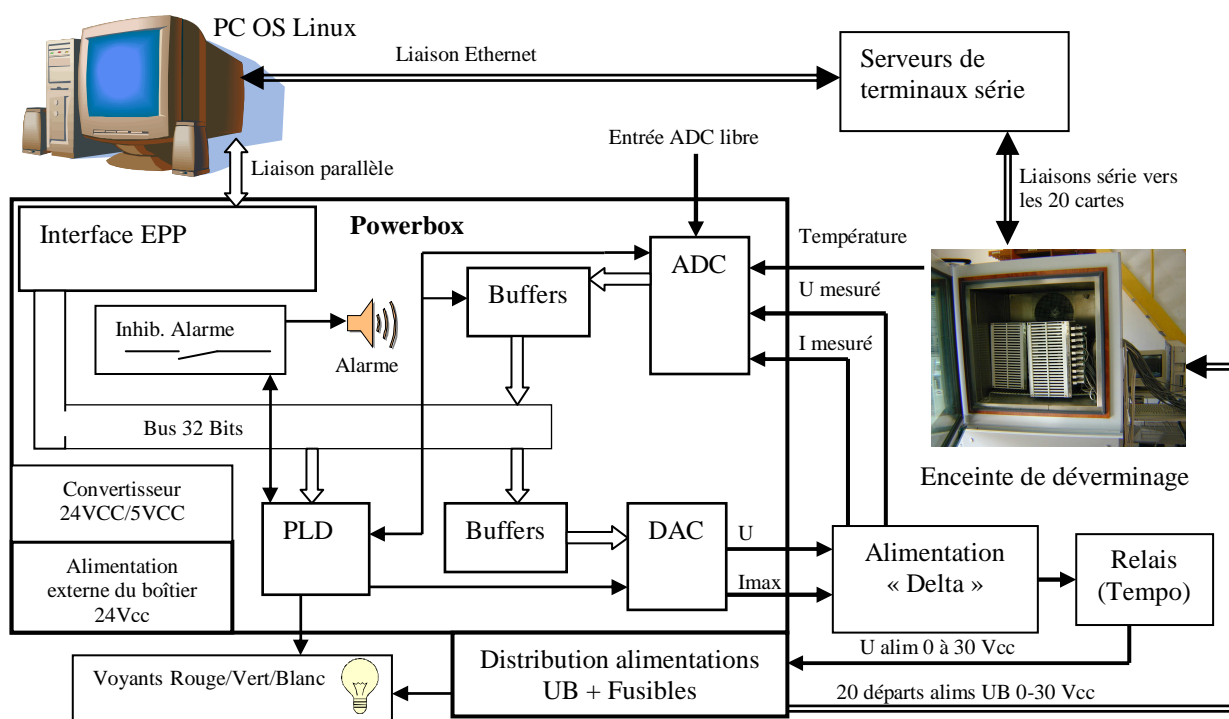


Figure 36 : Schéma fonctionnel du banc de déverminage

Un convertisseur analogique numérique CAN 8 bits avec 8 entrées analogiques de 0 à 5 Volts continu, dont seulement 4 sont utilisées permet la mesure de la tension d'alimentation et du courant débité (mesures fournies par l'alimentation). Il permet enfin la mesure de la température à l'aide d'un capteur délivrant 10 mV par degré Kelvin (0 Volts = 0°K = -273°C ; 3.08 Volts = 308°K = 35°C). Une mesure additionnelle est libre. Les signaux de contrôle des convertisseurs ainsi que les alarmes sonores et visuelles permettant de signaler un défaut sont générés par un composant logique programmable (PLD de marque « Lattice »). Dans ce PLD, une fonction « Watchdog » lance un compteur si elle ne reçoit pas un signal de réveil que doit

fournir l'ordinateur via le bus 32 bits. Si ce signal n'est toujours pas reçu dans un délai de 30 secondes, un voyant rouge de défaut est allumé et une alarme sonore est déclenchée. Cette fonction permet de détecter un défaut de l'ordinateur (arrêt du programme ou arrêt de l'ordinateur). Elle permet aussi de déclencher une alarme sur décision du programme de contrôle. L'alarme sonore peut être inhibée manuellement. L'information d'inhibition est envoyée à l'ordinateur qui l'enregistre. Lorsqu'il n'y a pas de défaut et que le banc est en service, un voyant vert est allumé. Un voyant blanc indique la mise sous tension des cartes.

La stabilité de l'alimentation « Delta » :

Lors du démarrage en charge (20 cartes), en suivi de consigne, l'alimentation « Delta » devient instable et envoie des harmoniques sur les cartes unifiées, ce qui entraîne le déclenchement des fonctions «TPS » et la mise en position éteinte des cartes durant 3 heures. Pour résoudre ce problème, il a été installé une temporisation permettant la mise sous tension des cartes par fermeture d'un relais environ 3 secondes après celle de la sortie de l'alimentation. Un simple circuit « LC » était aussi une solution intéressante, mais engendrait des perturbations sur les mesures de la Powerbox (oscillations, harmoniques).

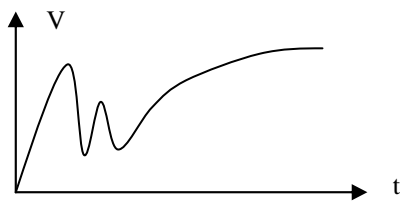


Figure 37 : représentation de l'instabilité de l'alimentation en suivi de consigne

Régulation en charge :

Pour 20 cartes alimentées, le courant total débité est de 3,2 Ampères. Le convertisseur numérique analogique (CNA) et le convertisseur analogique numérique (CAN) de l'interface électronique présentent une non linéarité à pleine échelle, et de plus, il y a une non linéarité de la réponse en tension de l'alimentation avec la charge. En conséquence, le système doit être étalonné en fonction des tensions mesurées en sortie du « CNA » pour chaque valeur appliquée sur son entrée et inversement pour le « CAN ». Pour le « CNA », la non linéarité réside dans le choix de l'étage de sortie qui a été conçu pour fonctionner avec une seule tension d'alimentation (le schéma classique utilisant une tension positive et une négative). Pour le CAN, on observe une légère distorsion de la lecture à pleine échelle. Cette distorsion

est relative au fonctionnement du CAN et à la précision des résistances sur ses entrées. La précision recherchée pour cette application étant relative, une bonne calibration permet de résoudre ces problèmes. La calibration est réalisée pour la charge nominale de 20 cartes.

Pour corriger cette distorsion, on évalue la fonction caractéristique de la tension mesurée ($V_{mesurée}$) en sortie du CNA ou en entrée sur CAN par rapport à la valeur lue avec le convertisseur (CAN) ou appliquée ($V_{convertisseur}$) sur son entrée numérique (CNA). On pose :

$$V_{mesurée} = V_{convertisseur} \times a + b$$

Avec a et b les paramètres de cette courbe caractéristique. Cette fonction permet donc de connaître la valeur réelle d'une tension mesurée en entrée du CAN en fonction de la valeur lue en tenant compte des distorsions. Pour connaître la valeur à appliquer sur le CNA afin d'obtenir une tension voulue en sortie, à partir de cette fonction caractéristique, on pose :

$$V_{convertisseur} = \frac{V_{mesurée} - b}{a}$$

Le calcul des paramètres a et b de cette fonction peut être réalisé par un programme de calibration automatique. Cette fonction consiste à écrire des valeurs dans le CNA et à demander à l'utilisateur d'entrer au clavier les valeurs réelles lues sur un voltmètre ou inversement pour une entrée du CAN.

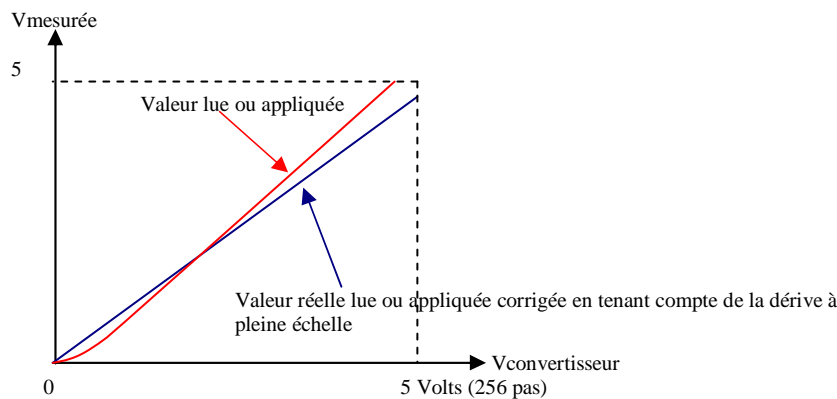


Figure 38 : Correction de la non linéarité du CNA et du CAN

Pour réaliser la régulation logicielle de la tension (figure 39), la consigne à appliquer s'écrit :

$$V_{appliquée} = V_{mesurée}(CNA) + K \times Erreur$$

Avec $V_{appliquée}$ la valeur de consigne à appliquer à l'alimentation,

K le gain statique appliqué sur l'erreur,

Et **Erreur** = $V_{mesurée}(CNA) - V_{mesurée}(CAN)$

Pour la régulation de la tension et afin d'éviter une oscillation permanente de la consigne, on tient compte du **pas de quantification**, et on ne **corrige** cette consigne que **si l'erreur** est **supérieure** à plus ou moins **0,1 Volts** sur l'échelle de 30 Volts, qui est une valeur supérieure à $Lsb/2$. Sur la figure 39, cette fonction « d'échantillonneur bloqueur logiciel » est représentée par B0. La mesure des voies du CAN et la correction de la consigne sont réalisées toutes les secondes. En effet, le pas de quantification avec 8 bits de données pour le CAN donc pour 256 valeurs est de 20 millivolts pour une échelle de 5 Volts, ce qui correspond à 0.12 Volts sur une échelle de 30 Volts ou bien 39 mA sur une échelle de 10 Ampères. Un gain (facteur d'atténuation) $K = 0,1$ est appliqué sur l'erreur (Erreur/10) pour avoir une correction lente et éviter de rendre instable la boucle de régulation de la consigne (si la fréquence d'échantillonnage est grande ce gain doit être petit).

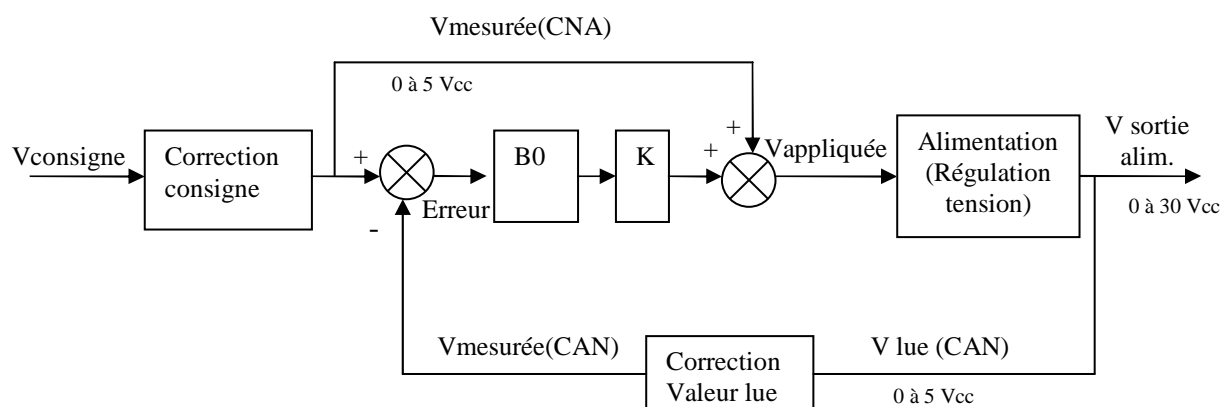


Figure 39 : Représentation la boucle de régulation logicielle

8.2.3. Le programme de contrôle du déverminage

Le logiciel a été développé sur un système d'exploitation Linux à l'aide d'un outil de création de fenêtres graphiques (Glade) et par une programmation en langage C. Ce logiciel contrôle le boîtier électronique, gère la communication avec les 20 cartes et contrôle le test fonctionnel minimal de chaque carte (slow control, voies séries). Les données des tests sont enregistrées sur l'ordinateur dans des fichiers *.log portant l'identification de chaque carte (par exemple ub-401.log) et stockés dans un répertoire dont le nom est la date et l'heure de lancement du test de déverminage. Un fichier power.log contient les données fournies par la Powerbox durant son fonctionnement. Pour une interprétation rapide des résultats, un programme

« verburn » édite un résumé pour toutes les cartes unifiées de tous les défauts détectés durant le déverminage, et un programme « verplot » trace la courbe de l'évolution des températures et des tensions des convertisseurs DC/DC pour chaque carte. En cas de défaillance de la Powerbox, il a été mis en place une procédure de remplacement pour ne pas bloquer la production. Cette procédure consiste à basculer en commande manuelle l'alimentation (2 interrupteurs sont prévus à cet effet à l'arrière de cet appareil) et à régler la tension à 25 Volts. Les opérations de stress électrique durant le déverminage ne sont alors plus réalisées.

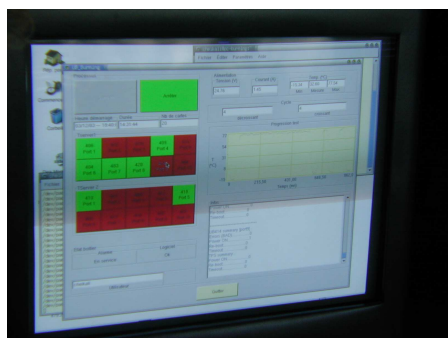


Photo 23 : Ecran du PC de suivi du déverminage



Figure 24 : Powerbox

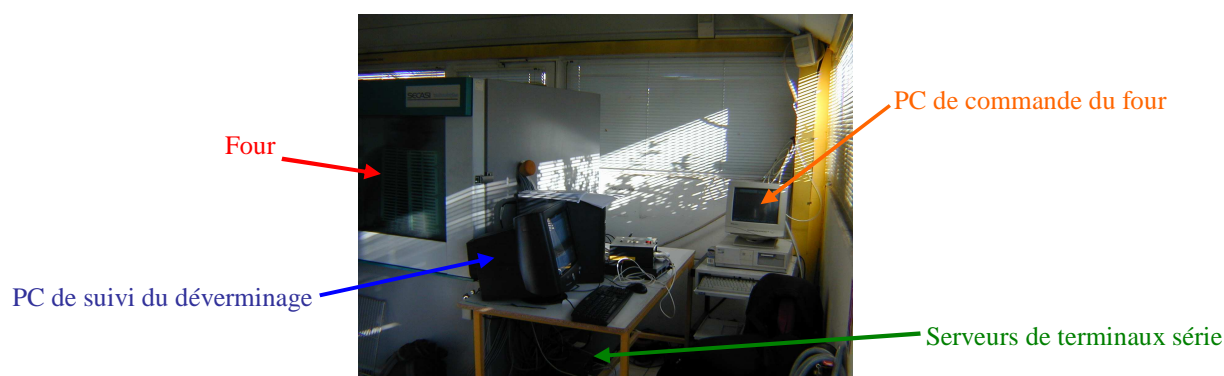


Photo 25 : Le banc de déverminage

8.3 La procédure de déverminage et sa calibration

La durée et les contraintes appliquées durant le déverminage doivent être suffisantes afin d'éliminer tous les défauts. Aucun défaut de jeunesse ne doit intervenir en exploitation dans les champs. En revanche, un déverminage plus contraignant que nécessaire, entraînerait un vieillissement prématuré des cartes. De plus, une durée de déverminage réduite à son strict

nécessaire permet de diminuer les contraintes sur la production de cette opération longue. Pour toutes ces raisons, la calibration fine de cette procédure est importante. Le schéma général choisi pour le déverminage des cartes unifiées est le suivant :

- Les cartes sont mises sous tensions et un programme de test minimal est lancé
- L'humidité voulue dans l'enceinte est réglée à 0% (au minimum)
- Pentes de décroissance en température : $-3^{\circ}\text{C} / \text{minute}$
- Pentes de croissance en température : $+4^{\circ}\text{C} / \text{minute}$
- Un premier palier à froid de -20°C
- Les paliers à froid permettent l'apparition de la majorité des défauts (courants plus importants, apparition des défauts de soudure par contraction)
- Un brûlage à 65°C est ensuite réalisé durant 6 à 10 heures pour vieillir les cartes
- Plusieurs cycles (de 5 à 10) thermiques, réalisés entre -20°C et $+65^{\circ}\text{C}$ avec des paliers de durée déterminée (30 minutes) pour les températures extrêmes. Ces cycles permettent de contraindre thermiquement les cartes et faire apparaître les défauts non décelés durant le premier cycle et le brûlage
- Un stress électrique est réalisé durant les 2 paliers extrêmes d'un des cycles : les cartes sont mises hors tension, et sont remises sous tension après 5 minutes d'attente (démarrage à chaud et à froid)
- La température de l'enceinte est ramenée à la température ambiante de 25°C à la fin du déverminage

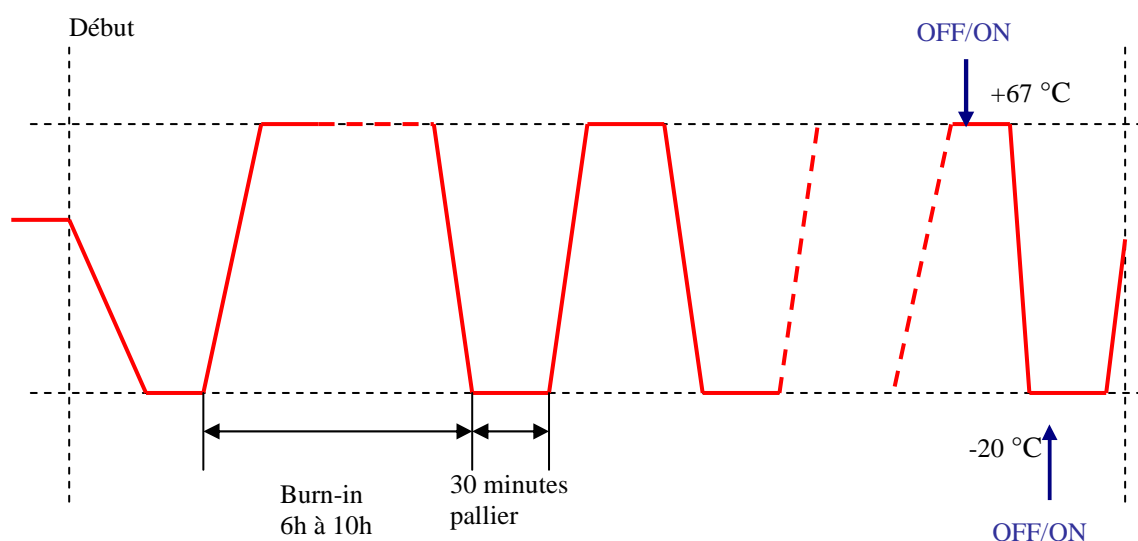


Figure 40 : Cycles en température et brûlage (Burn-in and stress screening)

8.3.1. Analyse de la réponse en température de l'enceinte thermique

La répartition de la température dans le four n'est pas uniforme. En raison de l'inertie thermique de l'enceinte, les températures extrêmes ne sont pas atteintes pour des paliers trop courts et des positions de cartes excentrées de la source de chaleur du four.

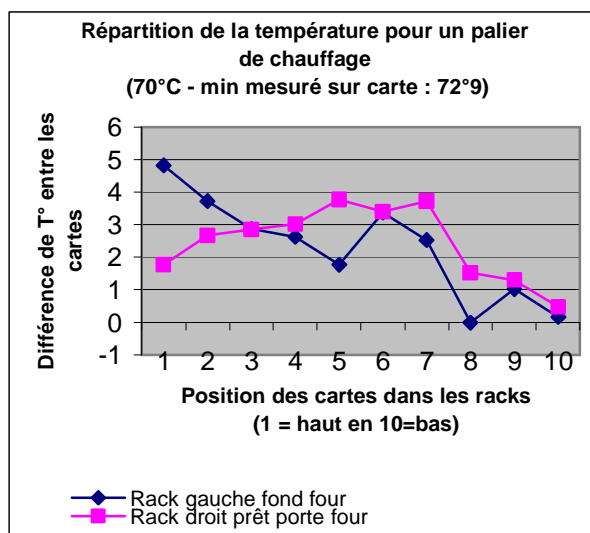


Figure 41 : Répartition à 70°C

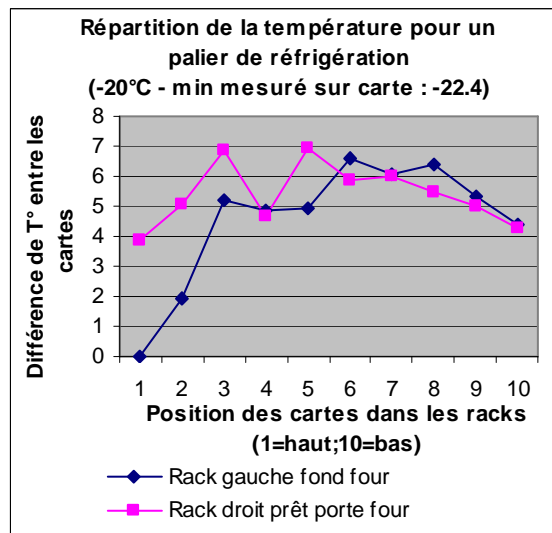


Figure 42 : Répartition à -20°C

Ce tracé de la répartition de la température dans le four à chaud et à froid a été réalisé en utilisant les données de températures enregistrées sur plusieurs cartes en fonction de leur position dans le four. Chaque point de ces courbes a été obtenu en moyennant les mesures pour chaque position prises au cours de plusieurs déverminages. Pour des zones proches de la

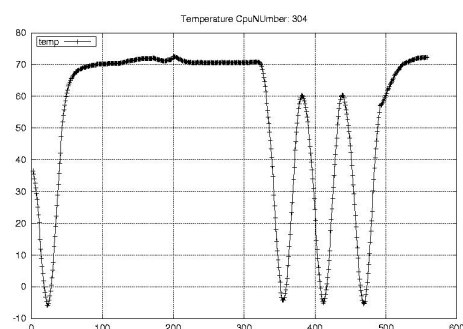


Figure 43 : Evolution de la température d'une UB pour des paliers de 10 minutes.

porte du four, donc éloignées de la source de chaleur (qui est située vers le fond du four, au milieu), la température devient uniforme quelque soit la hauteur et un temps d'attente plus important est nécessaire pour atteindre un palier en température souhaité, autrement dit, la constante de temps de variation de la température devient plus grande.

A l'aide de ces mesures, l'influence de la chaleur dégagée par les cartes dans le four sur la température relevée est évaluée à 5°C (La température moyenne sur les cartes est de 75°C pour une température de 70°C dans l'étuve). Cette constatation s'applique aussi à des

températures plus froides. Cette évaluation nous conduit à choisir de limiter la température maximale de l'étuve à 65°C afin de ne pas dépasser une température de 70°C sur les cartes. Initialement, la durée des paliers extrêmes en température avait été fixée à 10 minutes. Il a été constaté durant ces paliers que la température mesurée sur les cartes n'atteignait pas les valeurs extrêmes souhaitées (-20°C et +70°C) en raison de l'inertie thermique du four, donc il n'y avait pas de paliers à chaud et à froid. Pour des positions de cartes excentrées de la source de chaleur (en bas et sur le devant), cet écart était très marqué (figure 43).

A l'aide du logiciel « Matlab Simulink » il a été réalisé une modélisation du four contenant les cartes unifiées (UB) visant à reproduire la réponse en température observée pour des paliers extrêmes de diverses durées en appliquant en entrée une consigne de température programmée. L'influence de la chaleur dégagée par les cartes sur la température relevée est prise en compte pour cette simulation.

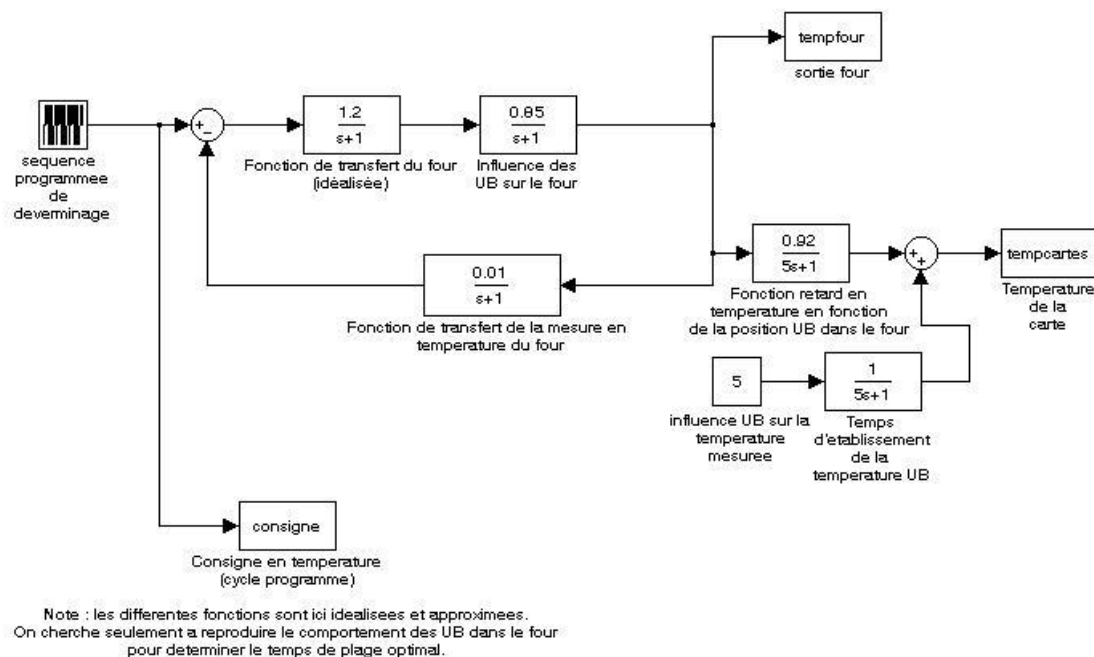


Figure 44 : Simulation de la réponse en température four+carte

En modifiant la durée des paliers et les pentes de variation, on a pu analyser la réponse en température sur une carte qui serait située à un endroit défavorable du four, c'est-à-dire en bas. L'objectif était de choisir une durée minimale de palier qui permette aux cartes en partie inférieure du four d'être soumises aux températures extrêmes définies pour le deverminage. L'allongement de la durée des paliers à 30 minutes est satisfaisant pour atteindre les valeurs extrêmes. Un palier plus long d'environ 50 minutes permettrait d'avoir un palier clair (stabilisation de la température pendant environ 10 minutes), mais il entraînerait une

augmentation significative du temps de déverminage ou obligerait à réduire le nombre de cycles de stress thermique ce qui n'est pas souhaitable en terme d'efficacité de la procédure.

La réponse simulée de l'ensemble four plus cartes est du 1^{er} ordre. Une variation de température de 5°C/minute engendre une pente de 3,4°C/minute sur les cartes et de 2.5°C/minute pour une variation de la température du four de 4°C/minute.

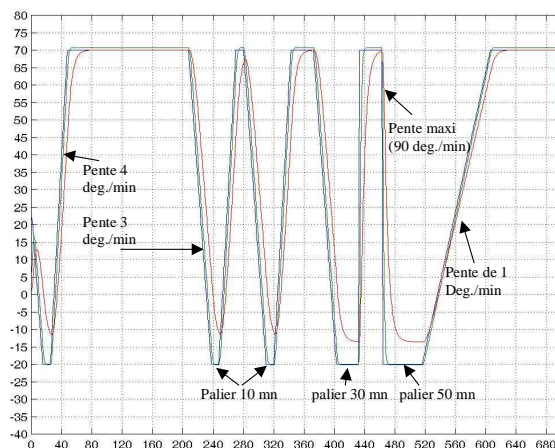


Figure 45 : Réponse simulée avec Matlab de la température du four et d'une UB

(En rose est représentée l'évolution simulée de la température sur une carte en position inférieure du four, en vert la réponse en température du four et en bleu la consigne).

Pour un **palier de 30 minutes** la température finit sa croissance ou décroissance pendant les 13 premières minutes de ce palier. Le choix de cette durée de paliers permet donc d'avoir une stabilisation en température aux valeurs extrêmes à chaud et à froid. Par rapport aux performances de l'étuve, il n'est pas possible d'augmenter la rapidité des variations de température. De plus, le choc thermique engendré par des variations trop rapides pourrait être destructeur sans toutefois apporter de gain en terme de déverminage.

8.3.2. Calibration de la procédure de déverminage

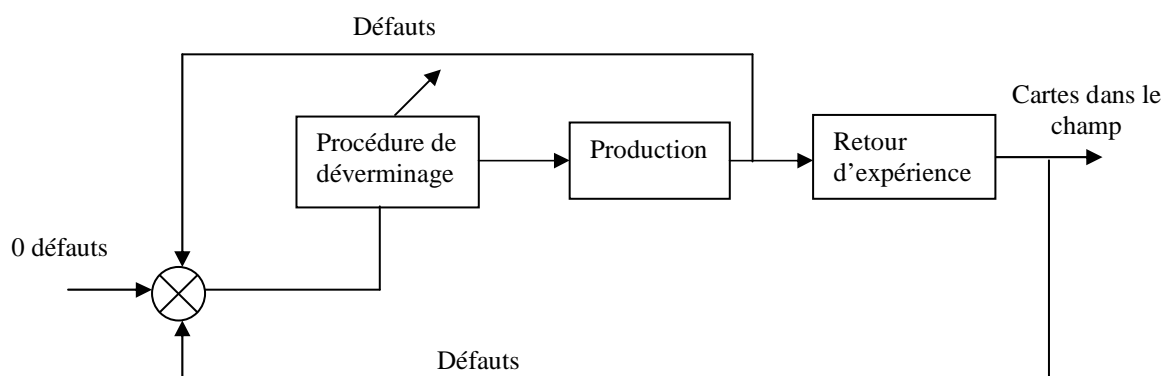


Figure 46 : Illustration de la calibration de la procédure de déverminage

Le principe est le suivant :

- Si durant les derniers cycles de température on ne constate pas de défaillances sur un lot de cartes déterminées, la durée du déverminage peut être raccourcie ; Elle doit être allongée dans le cas contraire
- Si des défauts de jeunesse apparaissent dans les champs, la procédure de déverminage doit être révisée

Pour vérifier l'efficacité du déverminage, une fiche de suivi est mise en place (à l'aide du retour d'expérience sur le terrain, et des données enregistrées automatiquement durant le déverminage). Elle liste le numéro de chaque série de cartes, et donne une analyse des défauts rencontrés afin de conclure sur l'efficacité du déverminage et de la nécessité ou non de modifier cette procédure.

La durée de la procédure et les contraintes étaient initialement fixées à 16 heures de brûlage et 10 cycles en température avec des paliers de 10 minutes pour une durée totale proche de 30 heures. La réponse en température de l'ensemble four plus carte ne permettait pas d'atteindre les valeurs maximales en température pour cette durée de paliers comme il l'est décrit en 8.3.1. La calibration de la procédure de déverminage a alors été initiée en appliquant un premier cycle à froid de -20°C suivi d'un brûlage à 70°C pendant 8 heures, puis de 9 cycles en température de -20 à 70°C avec des paliers de 30 minutes. Pour les déverminages suivants la température maximale a été ramenée à 65°C pour réduire la température sur les cartes. Un stress électrique est réalisé durant les 2 derniers paliers extrêmes. La durée totale étant de 27 heures et 13 minutes. Aucun défaut n'a été relevé durant les derniers cycles en température, après 430 cartes déverminées. Seulement 5 défauts imputables au déverminage ont été relevés. 3 défauts sont des défaillances de convertisseurs DC/DC durant le cycle de brûlage en raison d'humidité emprisonnée dans ces modules lors du nettoyage des cartes au cours de la production. Une solution est à l'étude pour étanchéiser ces boîtiers. Les 2 autres défauts sont intervenus à la fin du cycle de brûlage (Slow control et time tagging). Par conséquent, les défauts n'intervenant pas au cours des derniers cycles, il a été choisi de régler le déverminage comme suit :

- 1 cycle à -20°C
- 1 brûlage de 8 heures
- 7 cycles en température avec des paliers de 30 minutes (4°C/mn en montée et 3°C/mn en descente) et 2 coupures d'alimentation aux paliers extrêmes du 5^{ème} cycle

- Durée totale : 23 heures et 9 minutes
 - ø Cette durée est intéressante pour la production car on peut réaliser 1 déverminage par jour
 - ø A suivre aux prochaines séries...

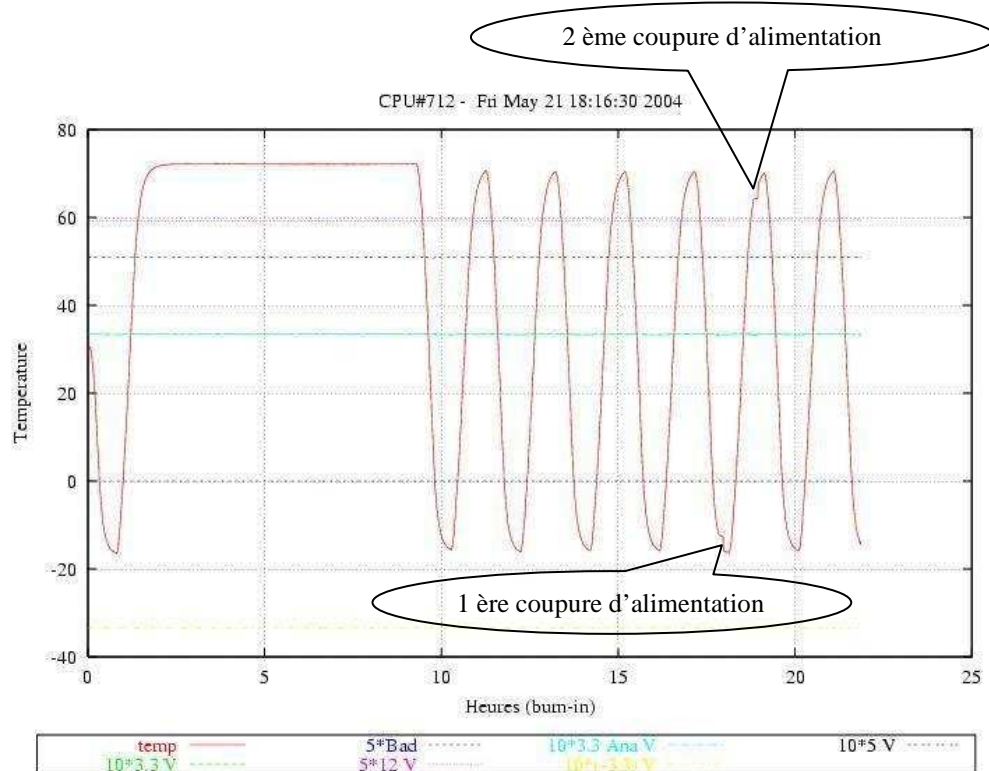


Figure 47 : Le déverminage réalisé sur les UB avec des paliers de 30 minutes

8.3.3. Identification des cycles

Le programme de déverminage doit identifier les phases de chaque cycle par la mesure de la température dans l'enceinte. Cette identification lui permet de déclencher le stress électrique au cours des paliers qui lui sont spécifiés et arrêter l'acquisition à la fin de la procédure. Cette fonction d'identification des cycles consiste à détecter les pentes montantes et descendantes et à incrémenter le nombre de cycles réalisés. Les faibles oscillations de température (erreurs dues à la précision de la mesure qui est d'environ 2°C, ou à la régulation du four pendant les longs paliers) ne doivent pas être identifiées comme des pentes. Les paliers extrêmes doivent être identifiés afin que le programme fonctionne quelque soit la température des paliers extrêmes (prise en compte de l'évolution de la température et pas de sa valeur absolue).

Principe de l'identification :

- La température est mesurée toutes les secondes. Afin d'éliminer les faibles oscillations essentiellement dues à l'imprécision de la mesure et à la régulation du four, c'est la valeur moyenne par minute de cette température qui est prise en compte.
 - La température des paliers extrêmes est déterminée par enregistrement des valeurs extrêmes
 - Lorsque plusieurs mesures successives de la température font apparaître une croissance supérieure à 15 degrés, un indicateur de croissance est activé. Il en est de même si une décroissance équivalente est constatée : un indicateur de décroissance est activé
 - Une fois par cycle, à chaque fois que :
 - L'indicateur de croissance est activé, alors le nombre de pentes positives est incrémenté
 - L'indicateur de décroissance est activé, alors le nombre de pentes négatives est incrémenté
 - Lorsque le 5ème cycle ou le cycle déterminé est atteint, car l'instant d'intervention de la coupure est réglable (identifié par le comptage des pentes) et qu'il reste moins de 10°C pour atteindre la valeur du palier extrême (bas ou haut), les actions suivantes sont successivement réalisées:
 - Une temporisation de 10 minutes est déclenchée (temps d'attente permettant d'atteindre la valeur maximale ou minimale de la température sur les cartes) et un indicateur de déclenchement est activé
 - On teste la fonction « TPS » en baissant et remontant l'alimentation, puis on commande la coupure de l'alimentation de toutes les cartes par leur « TPS »
 - Après coupure, la tension de l'alimentation des UB est mise à zéro (RAZ TPS)
 - Après 5 minutes les cartes sont remises sous tension
- Ces opérations sont réalisées pour le palier extrême bas (à la fin d'une décroissance) puis le palier extrême haut (à la fin d'une croissance) et permettent de réaliser des démarrages à froid et à chaud (contraintes électriques).

PARTIE IV : CALIBRATION, ACQUISITION ET INTEGRATION

9. Le trigger, la calibration du détecteur, et le software

9.1 Introduction

Il était prévu dans ce mémoire de consacrer une partie de l'étude au développement du logiciel d'acquisition implanté dans chaque station locale et particulièrement sur l'aspect de la sélection des événements constituant une approche système intéressante dans le sens où cette étude apporte une bonne connaissance de la réponse du détecteur en fonction des nombreux paramètres liés à son fonctionnement comme le réglage des gains, des niveaux de déclenchements, les courants, les températures...

Toutefois, ce travail est fortement lié à ce que nous appelons le « commissioning » qui vise à étudier les performances des premiers détecteurs installés, réaliser les premières analyses et corriger les simulations. Ce travail d'analyse long est réalisé par les chercheurs physiciens qui définissent les algorithmes de traitement des signaux. Le résultat de cette recherche permet de définir des stratégies pour la sélection des événements. Dans la première phase de développement d'un détecteur de physique, la sélection des signaux (Trigger) évolue beaucoup, car elle est fortement corrélée avec l'analyse des données.

Le choix initial de la collaboration était de re-écrire les algorithmes de « trigger » pour les implémenter sur les premiers détecteurs « de production ». Le souhait de porter toute notre attention sur la qualité de production, la mise au point des détecteurs et l'installation des premières séries, et l'attente d'un nouveau « noyau » du logiciel d'acquisition pour le réseau définitif, a conduit la collaboration à réviser cette stratégie et à choisir de conduire la phase de « commissioning » en utilisant le code développé sur le réseau prototype de 30 cuves et l'implémenter, moyennant quelques améliorations et modifications sur les premiers détecteurs du réseau définitif. L'écriture de nouveaux algorithmes sera par conséquent entamée dès lors que le nouveau noyau du logiciel d'acquisition sera prêt (Durant l'année 2004). Pour valider les nouveaux développements logiciels, une dizaine de tanks ont été réservés sur une partie de la Pampa facilement accessible.

J'ai toutefois étudié cet aspect système fort intéressant, non seulement dans l'objectif de cette étude et par curiosité, mais aussi parce que la compréhension des problématiques de calibration et de sélection des signaux et de la physique est indispensable à la vérification des performances des cartes que nous produisons. Le test de nos cartes dans le champ est réalisé

en fonctionnement normal, c'est-à-dire avec leur programme d'acquisition. Il convient donc lors de l'installation à l'aide de programmes de test ou essentiellement d'espionnage de l'acquisition (« minispy ») d'analyser avec précision le bon fonctionnement des stations locales. Il en est de même durant l'exploitation grâce à l'analyse des données recueillies par le central d'acquisition. Beaucoup de problèmes peuvent être détectés en analysant les données fournies par les détecteurs. Il faut être capable de distinguer :

- Des problèmes matériels ou de conception comme par exemple des variations soudaines de l'amplitude du signal ou une oscillation de la ligne de base (le bruit de fond) pouvant indiquer une détérioration d'un photomultiplicateur, d'une voie de mesure du Front End ou bien une défaillance sur la commande par le slow control du gain d'un photomultiplicateur
- Un défaut du logiciel (erreur dans un algorithme).

Par exemple, un saut dans le marquage en temps d'évènements est un problème pouvant être relatif à la programmation ou à l'électronique (diaphonie sur une ligne par exemple) qu'il faut savoir analyser

- Une erreur dans l'analyse des données

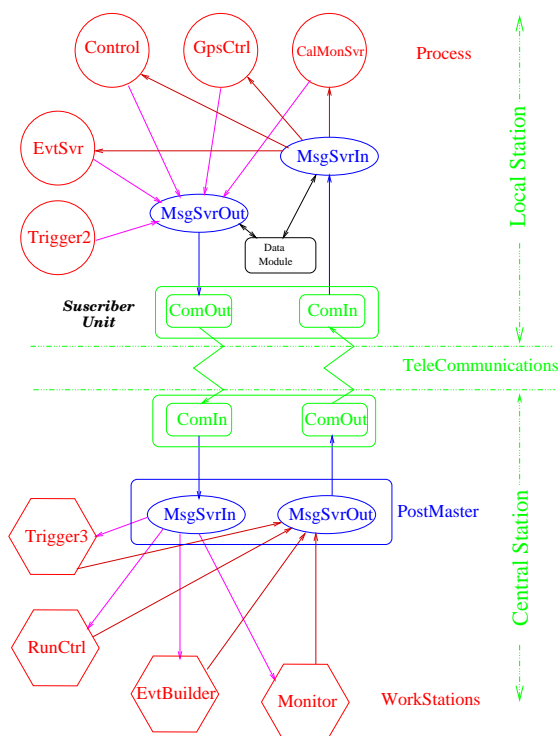
Cette analyse rapide de la cause de problèmes permettant une correction ou maintenance de l'électronique si cela est nécessaire s'appuie donc sur cette connaissance souhaitable du logiciel d'acquisition.

9.2 Le logiciel de contrôle des stations locales et d'acquisition

Le logiciel d'acquisition et de contrôle des stations locales est développé sur un système Microware OS9000 multi tâche, temps réel, en utilisant pour la programmation le langage C. Le développement, principalement à la charge de notre laboratoire, est réalisé avec l'aide de chercheurs de l'université de l'état de Pennsylvanie et du Fermilab de Chicago aux Etats-Unis. Un chercheur détaché en permanence sur le site Argentin apporte aussi une contribution importante. Le développement du logiciel d'acquisition des stations locales est fortement corrélé avec le développement du code du central d'acquisition de l'observatoire, dont l'écriture est réalisée en langage C++ comme pour les codes d'analyse. Le format des données et des messages a été défini par une collaboration entre notre laboratoire et le CDAS.

L'ensemble des fichiers est mis à la disposition de la communauté des développeurs sur un serveur (« CVS repository ») afin de faciliter le travail en commun.

Chaque fonction des stations locales et de la station centrale est indépendante. La communication entre les stations locales et la station centrale est réalisée au moyen de messages envoyés par radio (serveurs de messages MsgSvrIn, MsgSvrOut).



Les données acquises sont stockées dans des zones de mémoires circulaires (Buffers) en attendant d'être envoyées si elles sont sélectionnées. Parmi les fonctions principales d'une station locale :

- Control gère la station locale
- CalMonSvr est en charge de la calibration et du suivi des paramètres (« monitoring »)
- GpsCtrl gère le GPS et la gestion du temps
- EvtSvr est le serveur d'évènements
- Trigger2 permet la sélection des évènements

Figure 48 : Schéma fonctionnel du logiciel d'acquisition (côté station et côté CDAS)

- Dans la station centrale on remarque la fonction Trigger3 qui sélectionne certains des évènements signalés par les stations locales (voir paragraphe 9.3)

9.3 La sélection des signaux

La sélection des évènements ou « trigger » de l'Observatoire Pierre Auger se fait à 3 niveaux. Les deux premiers niveaux sont réalisés dans chaque station locale. Le troisième est réalisé via le central d'acquisition (CDAS).

Le premier niveau (T1 Fast ou Fast events) : déclenchement électronique appliqué sur les données numérisées à partir de paramètres chargés dans des registres du Front End. Ce déclenchement **génère un signal d'interruption envoyé au processeur**. Il y a 2 types de « triggers » T1 Fast différents :

- **T1A** : déclenché si un ou plusieurs canaux (échantillons) des 6 CAN rapides (dits « Flash ADC : FADC ») enregistrant le signal des anodes et dynodes des

Photomultiplicateurs (PM) ont un signal d'amplitude supérieure à un certain seuil (programmable dans un registre du PLD du Front End). Le niveau de déclenchement est constamment réajusté pour atteindre une fréquence de déclenchement de 100 Hertz.

- **T1B ou TOT** : déclenché si dans une fenêtre de temps donnée, un certain nombre de canaux (échantillons) d'un certain nombre de voies du CAN dépassent un seuil d'amplitude choisi (paramètres de fenêtre temporelle et de seuil programmé dans le PLD du FE). On appelle ce trigger le « Time Over Threshold ». Il consiste à acquérir le signal pour les stations situées loin du cœur de la gerbe, signal caractérisé par son amplitude plus faible répartie sur une longue durée (quelques μ s). Sa fréquence est proche de 1 Hertz par station. Une calibration est faite sur les données de T1B pour équilibrer les réponses de chaque PM et les paramètres de ce trigger sont modifiés en conséquence dans la carte Front End (voir le paragraphe 9.4 traitant de la calibration).

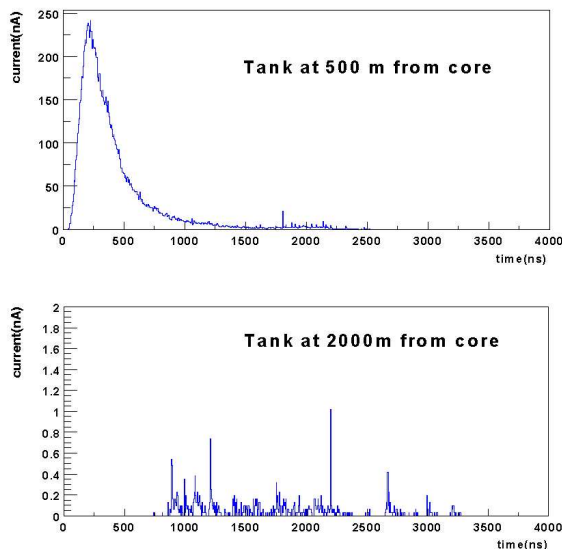


Figure 49 : Simulation d'une gerbe de protons de $5 \cdot 10^{20}$ eV avec un angle de 30° détectée dans des cuves Tcherenkov à 500 et 1000 mètres du cœur (sur la figure du haut, c'est le trigger de seuil qui déclenche, sur la figure du bas c'est le trigger « TOT ». Le signal des cuves du cœur de la gerbe est entièrement saturé pour une telle énergie)

Le trigger slow (T1 slow) : ce déclenchement réglé à un très bas niveau de seuil permet l'acquisition des signaux générés par le flux de muons (environ 3000 par seconde sur les 10 m^2 de la cuve). Ces signaux sont utilisés pour la calibration du détecteur (paragraphe 9.4).

Lorsqu'un déclenchement de niveau 1 est généré, une interruption (EVTCLKF ou EVTCLKS) est envoyée à la fois au processeur et au time tagging. L'heure précise de détection de l'évènement est ainsi sauvegardée par le time tagging et est collectée par le processeur qui joint cette donnée temporelle avec les données provenant du Front End. Des compteurs d'évènements contrôlés par le Front End et envoyés au time tagging permettent la comptabilisation précise du nombre d'évènements détectés, afin de vérifier qu'il n'y a pas d'erreur dans le comptage des évènements (la présence d'un bruit électronique peut entraîner le faux marquage en temps d'un évènement par le time tagging).

Le deuxième niveau (T2) : déclenchement software dans la Station Locale. Appliqué sur les signaux issus des T1 Fast, il permet de réduire à 20 Hz par station la fréquence moyenne des événements. Lorsque l'interruption (trigger 1) envoyée par la carte Front End se produit, un transfert DMA* est lancé pour recueillir les données enregistrées dans le buffer de sortie correspondant de la carte Front End (elle contient 2 buffers par voie, permettant, lorsque l'un d'eux est rempli, de travailler sur l'autre et de réduire ainsi le temps mort). Les données lues par le DMA contiennent 256 échantillons (canaux) de FADC avant le déclenchement de niveau 1 (T1) et 512 après (voir figure 50). Les premiers échantillons permettent d'évaluer la ligne de base (le bruit électronique) à soustraire du signal contenu dans les 512 suivants. Si l'intégrale du signal dépasse une certaine valeur et qu'une coïncidence des 3 tubes photomultiplicateurs est observée, il y a un déclenchement de deuxième niveau. Toutes les données (T1) sont enregistrées dans une zone de la mémoire vive (BufRaw). Chaque seconde, les temps des T2 sont envoyés à la Station Centrale avec une estimation de leur énergie. Cette compression de données permet au CDAS de traiter rapidement les données. Dans chacune des Stations Locales, le taux de T2 est d'environ 20 Hz.

Le transfert DMA (Direct Memory Access) : il permet lorsque le Front End génère une interruption (Trigger 1) de transférer directement vers la mémoire vive de l'UB (DRAM) les données qu'il a en mémoire. Le Power PC, qui dispose d'un contrôleur de DMA, reçoit une interruption (EVTCLKF ou EVTCLKS en fonction de la nature Fast ou Slow du trigger) provenant du FE et autorise le transfert des données (DMA Acknowledge) en théorie sans temps d'attente (Wait state), c'est-à-dire à la fréquence du bus. Un signal (DMADXFER) réalise cette synchronisation avec le bus (40 MHz soit 25 ns par coup d'horloge). Ainsi, le contrôleur DMA permet de transférer les données sans mobiliser les ressources du processeur (le signal DMA Request permettant normalement de solliciter directement le contrôleur DMA n'est pas utilisé étant donné que l'interruption EVTCLK remplit cette fonction).

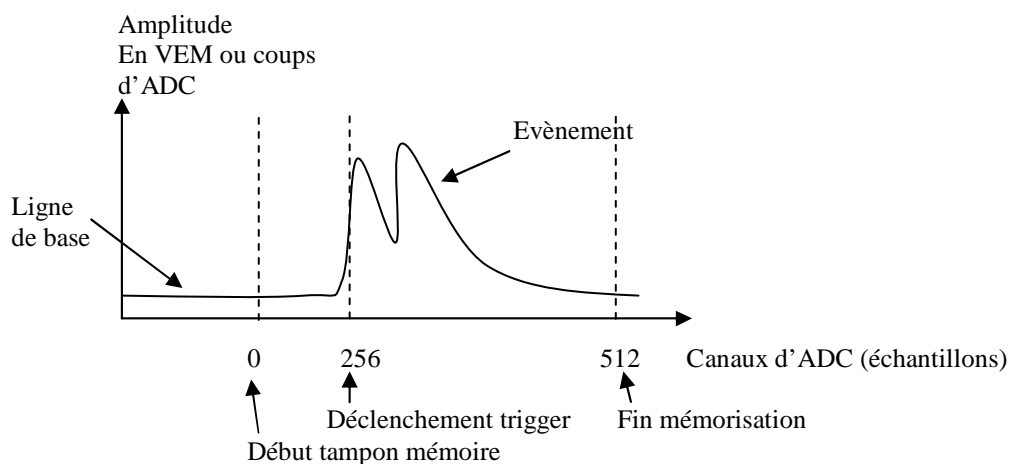


Figure 50 : format des données lues par le DMA

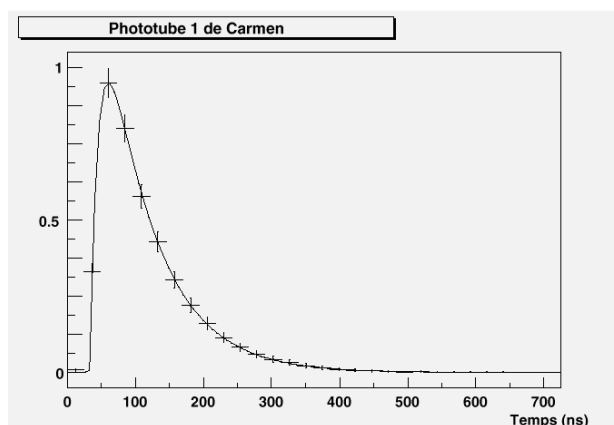


Figure 51 : Signal typique d'un tube photomultiplicateur

(Ici un muon de 15 ns de temps de montée et 70 ns de temps de descente)

Principe de la régulation de la fréquence des déclenchements : on calcule la fréquence moyenne des déclenchements. Si celle-ci est supérieure à la fréquence souhaitée, on augmente le seuil de déclenchement de un pas de CAN. Dans le cas contraire on diminue de un pas du

CAN et on recommence jusqu'à l'obtention de la fréquence souhaitée. Cette correction lente est très efficace (sur la figure 52 on constate la parfaite stabilité des triggers T1, T2 et TOT). La figure 54 illustre le principe général de contrôle des triggers et de la calibration.

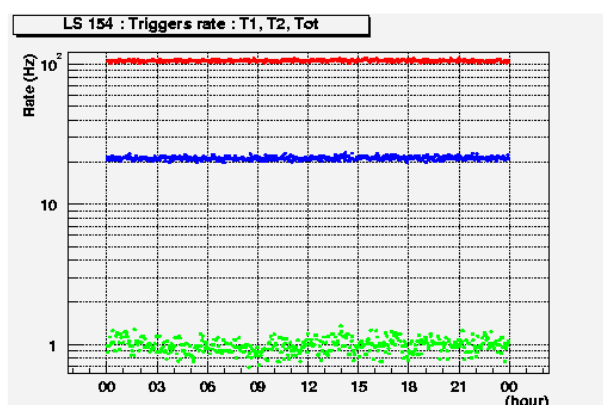


Figure 52 : Régulation de la fréquence des triggers (T1A en rouge, TOT en vert et T2 en bleu)

Pour des raisons physiques, sur certains photomultiplicateurs la bande de base peut fluctuer, sa valeur augmentant par exemple soudainement de 4 LSB et revenant seulement au bout de plusieurs centaines de microsecondes à sa valeur initiale. Cette variation entraîne un biais dans les données et les déclenchements (voir paragraphe 9.4 « Calibration »). Pour résoudre ce problème, un filtre permettant le suivi et la régulation de la bande de base numérique a été implémenté. Ce filtre corrige les fluctuations de la bande de base avant d'y appliquer le trigger 2. Cette régulation permet de prendre en compte les changements lents tout en restant insensible aux courtes fluctuations.

Le principe de correction de la fluctuation de la ligne de base :

Si le signal < ligne de base calculée, ajouter Delta à cette ligne de base

Si le signal > ligne de base calculée, soustraire Delta,

Avec Delta réglé à 1/256 de pas de CAN.

Le troisième niveau (T3) : déclenchement logiciel depuis la Station Centrale (CDAS). Il permet de réduire le taux d'évènements sélectionnés à 0.2 Hertz pour tout le site. Le CDAS reçoit 20 T2 par seconde de chaque Station Locale. Par une simple corrélation spatiotemporelle (au moins 4 stations voisines ayant un T2 dans une fenêtre de 20 μ s), le taux de trigger T3 est réduit à environ 0.2 Hz pour le réseau complet. Cette diminution drastique s'explique par le fait que la très grande majorité des déclenchements générés dans les stations locales (T1 et T2) sont causés par des gerbes de relativement faibles énergies. Au niveau de la station centrale est réalisée une corrélation de plusieurs stations signant des gerbes étendues de hautes énergies et donc très rares. La Station Centrale calcule alors, pour chaque Station Locale le temps auquel s'est produit le T1 et leur transmet l'ordre de rapatrier les données correspondantes. Une compression des données permet de réduire leur temps de transmission. Chacune de ces Stations va alors fouiller dans son buffer (« BufRaw ») pour rechercher les données de ce trigger, puis les envoie à la Station Centrale. Le dialogue entre la Station Centrale et les Stations Locales se faisant par voie hertzienne, chacun des paquets envoyés peut mettre jusqu'à 5 secondes pour arriver à destination (s'il y a des erreurs de transmission, les paquets sont redemandés et renvoyés). Les Stations Locales doivent donc conserver au moins 10 secondes de données T1 (soit à 100 Hz, plus de 1000 évènements) dans l'éventualité d'une requête du CDAS.

Un déclenchement de niveau 3 est de plus émis toutes les 3 minutes sur un « trigger » de niveau 2, pris au hasard dans l'objectif d'analyser le bruit de physique. Chaque évènement contient les données des CAN rapides (les réponses des 6 FADC sont codées sur 8 octets, soit 8 Kilo Octets) enregistrées par la carte Front End, des données de calibration, de « monitoring » (mesures du slow control) et de marquage en temps. Il y a donc environ 10 Kilo Octets de données enregistrées pour chaque T1 (soit durant 10 secondes, plus de 10 Mégas Octets à conserver) qu'il faut envoyer à la Station Centrale sur requête de celle-ci.

La bande passante de notre système de télécommunication étant très réduite (150 Octets par station et par seconde), la transmission d'un évènement peut prendre plusieurs minutes.

Lorsqu'un déclenchement de niveau 3 de fluorescence intervient, le central d'acquisition reçoit de l'observatoire de fluorescence les informations nécessaires à la recherche au sol de la gerbe pour réaliser un déclenchement hybride (même évènement vu par les 2 types de détecteurs). L'évènement présenté en figure 53 et enregistré au mois d'Octobre 2003 est la première observation au monde d'un évènement en mesure hybride stéréo. C'est-à-dire, que la même gerbe de particules a été observée à la fois par 2 télescopes de Fluorescence distants de

quelques dizaines de kilomètres (détection stéréo) ainsi que par des détecteurs de surfaces (6 stations touchées – détection hybride : observation du même évènement par les détecteurs de surface et de fluorescence).

L'énergie de reconstruction de cet évènement a été estimée aux environs de $2 \times 10^{19} \text{ eV}$.

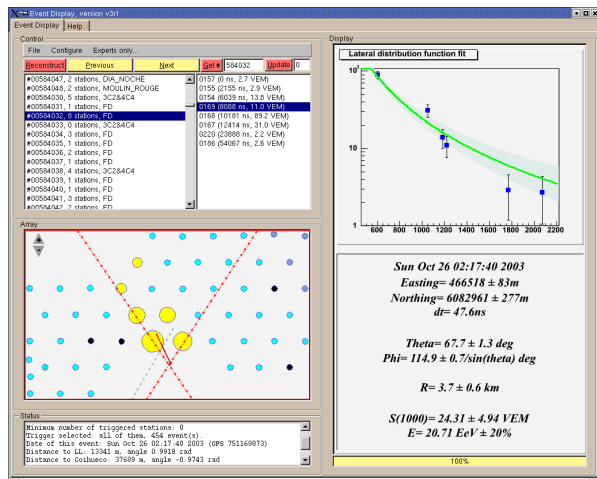


Figure 53 : Exemple de trigger niveau 3 (6 cuves)

Le quatrième niveau (T4) : Toutes les données de niveau 3 sont conservées dans la Station Centrale et envoyées, chaque nuit, vers 3 sites miroirs. Ce sont les centres de calcul de Buenos Aires, du Fermilab à Chicago et de Lyon. Chaque laboratoire de la collaboration peut se connecter sur un de ces sites et appliquer sur les données des algorithmes de sélection plus sophistiqués. Cette nouvelle sélection effectuée, les données permettent alors de calculer les paramètres des rayons cosmiques ayant généré les gerbes (direction, énergie et nature du rayon primaire). La répartition géométrique de la gerbe au sol est aussi utilisée pour l'analyse.

9.4 La calibration

Les courbes de gains de chaque photomultiplicateur sont relevées en usine. Le gain d'un photomultiplicateur varie en fonction de la tension appliquée sur son embase.

Un premier test consiste à vérifier la linéarité des photomultiplicateurs à l'aide du Led Flasher. Le rapport dynode sur anode doit être de 32 pour une bonne linéarité. Cette mesure est réalisée en envoyant plusieurs impulsions lumineuses successives des 2 Leds et en réalisant de multiples mesures avec des amplitudes différentes. On vérifie aussi, qu'en appliquant les mêmes valeurs de tension sur les bases des photomultiplicateurs qu'en usine on

retrouve les mêmes gains. Autrement, la dérive, si elle n'est pas trop grande doit être caractérisée. La non linéarité des photomultiplicateurs est leur première cause de défaillance à leur sortie d'usine.

Afin de mesurer les fluctuations des PMT (mauvais comportement ou effets de la température) un suivi en ligne de la valeur du Muon Vertical Equivalent « VEM » a été implémenté. Le VEM est l'amplitude du pic du signal généré par un muon entrant verticalement dans la cuve. Cette unité de base a été fixée pour cette expérience à 50 coups de CAN (1 coup de CAN correspond à la valeur du pas de quantification). La connaissance du VEM permet d'évaluer le nombre de particules entrant dans la cuve. Le trigger de niveau 1 est réglé à 150 coups de CAN (fréquence T1 = 100 Hertz), ce qui correspond à environ 3 VEM. Les muons sont des particules issues du rayonnement cosmique dont on connaît très bien la signature et qui nous sont donc très utiles pour la calibration de notre mesure. On en compte environ 300 par mètre carré et par seconde, soit environ 3000 par seconde pour 10 mètres carrés qui est la surface de la cuve. Le trigger de muons (T1 Slow) implémenté sur les détecteurs permet de stocker le signal des muons dans un « muon buffer » (supportant jusqu'à 8 kHz de données). Ces données sont acquises à partir d'un seuil de 0,1 VEM avec une fréquence de l'ordre de 3 kHz. A partir des signaux des convertisseurs rapides du Front End « FADC » obtenus (20 échantillons d'une durée totale de 500 ns, incluant 3 échantillons de « pré trigger ») des histogrammes sont réalisés et la hauteur « moyenne » du pic du signal des muons est calculée en l'intégrant pour chaque photomultiplicateur. Les hautes tensions appliquées sur les photomultiplicateurs (donc le gain) sont individuellement ajustées pour obtenir une amplitude du VEM de l'ordre de 50 coups de CAN. Dans le principe, on calcule la valeur du VEM pour chaque PMT et on règle les tensions de manière à obtenir 110 Hertz de T1 avec une fréquence d'évènements de 70 Hertz à 2,3 VEM pour chaque PMT individuellement et obtenir une coïncidence des 3 photomultiplicateurs. Cet algorithme met environ 3 minutes pour équilibrer les 3 photomultiplicateurs.

Une calibration hors ligne est aussi réalisée sur les données avant de procéder à leur analyse. Afin de contrôler les performances du système et l'efficacité de la calibration en ligne, des blocs de monitoring (tensions, courants, températures...) et des informations sur la calibration sont envoyés au CDAS toutes les 6 minutes. Les informations concernant la charge des batteries peuvent être utilisées pour mettre hors service les détecteurs si par exemple on constate après plusieurs jours de mauvais temps une tension trop basse (jamais arrivé jusqu'à présent). Enfin, toutes les 4 heures, 1000 blocs de données sont envoyés au CDAS afin de contrôler la calibration en ligne et tester de nouveaux algorithmes. Le CDAS contrôle et valide les valeurs de calibration (hautes tensions des photomultiplicateurs).

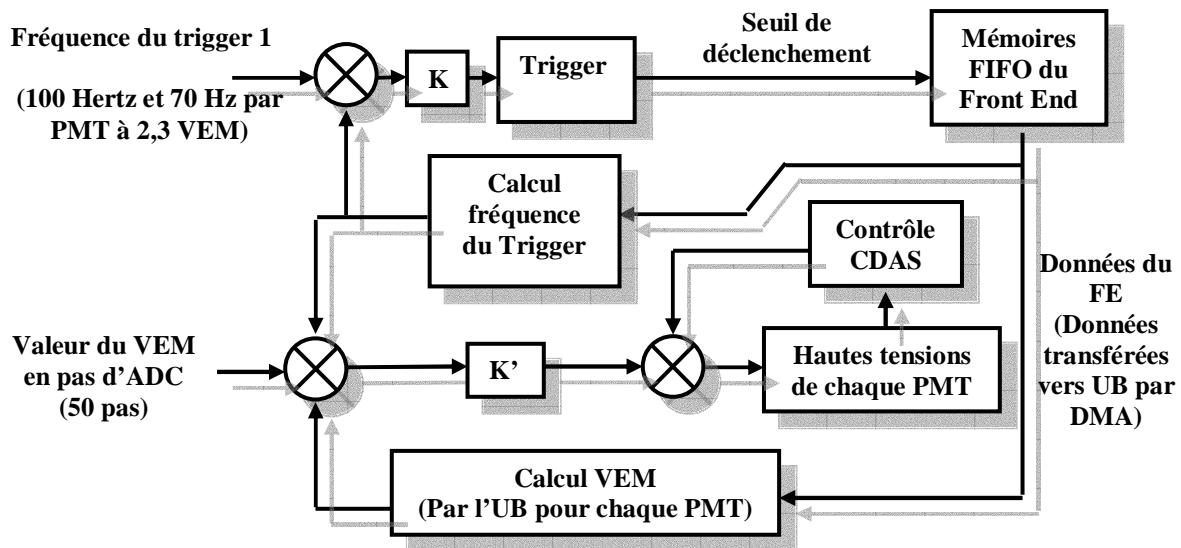


Figure 54 : Ajustement du trigger et calibration automatique

On appelle « erreur », la différence entre la consigne (autrement dit la référence) souhaitée et la valeur réelle mesurée. Pour le « trigger » on fixe comme **consigne 100 Hertz** de fréquence de déclenchement et on corrige le niveau du « trigger » à partir de la mesure réelle de la fréquence des événements. Pour la calibration, on fixe comme consigne la valeur du VEM à 50 coups de CAN, et on corrige les hautes tensions des PMT en fonction de la valeur réelle mesurée du VEM pour atteindre la consigne désirée. K et K' représentent les gains appliqués sur la correction des erreurs. La valeur du niveau de déclenchement dans le registre du PLD pour le « trigger » ou de la haute tension pour les PMT est incrémentée ou décrémentée d'un pas (voir plus ou même moins en fonction du gain) de CAN (trigger) ou de CNA (hautes tensions des PMT) à chaque itération en fonction du signe de l'erreur.

9.5 Analyse des signaux et détection de problèmes

L'analyse des signaux de la station locale, comme mentionné en introduction de ce chapitre, nous donne une bonne compréhension du fonctionnement du détecteur.

En effet, l'analyse des histogrammes du signal peut nous permettre de détecter par exemple l'absence d'un bit sur un CAN ou sur le bus ou bien la dérive du gain d'un phototube.

La qualité de l'eau et du liner peut être analysée en mesurant le temps de descente du signal généré par un muon. Le niveau de l'eau dans la cuve est déduit de la pente de l'histogramme de chaque PMT dans une échelle de 1,5 à 2,5 fois le VEM.

10. Intégration sur le site d'expérience



Une part importante, et certainement pas la moins intéressante de ce projet est bien évidemment l'installation sur le terrain. A l'heure de la rédaction de ces lignes, je me suis déjà rendu à 7 reprises à Malargüe en Argentine. Dans cette ville sont installés le central d'acquisition et les édifices de l'observatoire Pierre Auger. Malargüe est peuplée de 20 000 habitants et est située au sud de la province de Mendoza, au pied de la Cordillère des Andes et au bord de la Pampa Amarilla. Près de 27 heures de voyage au total sont nécessaires pour se rendre sur le site depuis Paris. Les premiers voyages, il y a maintenant 3 ans, ont été consacrés à l'installation du réseau prototype et la mise au point de l'électronique. Les voyages suivants ont été consacrés à la mise au point de la version de production du détecteur. A l'heure actuelle, nos activités sur le site consistent :

- A définir la logistique, les procédures de qualité et de test pour l'installation de nos cartes,
- A installer des équipements de test,
- A assurer la formation des personnels sur place (Une vingtaine de personnes sont employées),
- A participer à l'installation. En particulier lors d'arrivée de matériel une aide est bienvenue (organisation de « shifts »). Ces aides permettent de soutenir le rythme de déploiement avec une qualité optimale et d'apporter un regard d'expert externe,
- Au développement et à la correction de programmes informatiques (liés aux UB)
- Au suivi des cartes, au retour d'expérience, à l'analyse des défaillances et de l'état des cartes dans les champs.

De plus, 2 fois par an ont lieu sur place les rencontres de la collaboration Auger (300 scientifiques environ) qui permettent de discuter de l'avancée des travaux. J'ai été conduit, à plusieurs reprises, à représenter notre équipe dans les discussions d'électronique au cours de ces réunions et à réaliser des présentations orales devant mes collègues de la collaboration, qui m'ont réservé un accueil très favorable. Une réelle satisfaction, est aussi d'avoir réalisé une présentation en présence de Monsieur Jim Cronin, physicien initiateur du projet et prix Nobel de physique. Son écoute attentionnée, sa sympathie et sa simplicité m'ont beaucoup impressionné.

La logistique :

Un bâtiment d'assemblage attenant à l'office building (bureaux et CDAS) est utilisé pour le montage des cuves et la vérification des équipements avant le départ dans les champs. Plusieurs autres bâtiments sont loués dans la ville pour diverses opérations d'assemblage. De plus, quelques opérations sont sous traitées auprès d'entreprises locales. L'électronique est



assemblée dans un bâtiment loué de 300 mètres carrés (baptisé SDE-co). J'ai participé aux réflexions concernant l'aménagement du bâtiment, l'écriture et la mise au point des procédures de qualité, d'assemblage et de test. La logistique et les flux de circulation des cartes dans le bâtiment d'assemblage sont des points importants pour la qualité qui ont été pris en compte pour l'écriture des procédures.

Photo 26 : Bâtiment SDE-co

Une base de données centralisée permet de lister les cartes installées dans les champs, et l'état de l'ensemble des stocks. Les besoins en cartes et en composants (jusqu'au moindre écrou) y sont recensés. Les responsables d'approvisionnement sont directement prévenus lorsqu'ils doivent expédier du matériel sur le site afin de permettre la poursuite du déploiement. Tous les numéros d'identification des cartes et des « kits » et des éléments qui les composent sont notés dans cette base. On appelle « Kit » l'assemblage des éléments qui forment une station locale électronique pour un détecteur de surface. Une base de données spécifique aux cartes unifiées a été développée (intégration prochaine dans la base de données générale du site). Elle permet de recenser:

- Les problèmes constatés durant la production (réparation manuelle...)
- Le statut courant de chaque carte :
 - Position géographique (Pampa, SDE-co, LST, CDF, ...)
 - Date
 - Hors service : réparation nécessaire (et description du problème)
 - Remarques et historique : Durant la production et la vie des UB
 - Avertissement : une attention spéciale est requise pour cette UB (par exemple, installer cette carte à un endroit d'accès facile...)
 - Irréparable: UB définitivement morte...

L'intégration des « kits » et les tests :

Chaque élément est contrôlé visuellement à son arrivé, puis testé séparément avec son propre banc de test. Les données de chaque test sont enregistrées. Après chaque étape d'assemblage ou de test les cartes sont re-stockées dans des caisses différentes pour ne pas risquer de les mélanger. Un kit électronique comprend une carte Front End, un GPS et une carte Led Flasher qui sont montés sur la carte unifiée dans un boîtier métallique. La radio et le « micro-TPCB », sont montés dans des boîtiers séparés. Le kit complet est ensuite testé. Le dernier test consiste à connecter l'ensemble électronique à une cuve de test installée à l'extérieur du bâtiment et dont les câbles sont ramenés à l'intérieur. La base de données est enfin renseignée. Pour le test complet des kits, j'ai réalisé le développement d'un logiciel de test sous Linux lors de mes dernières missions sur le site à Malargue. Toutes les entrées et sorties des CNA et CAN ainsi que le port radio sont bouclés à l'aide des poignées conçues dans le cadre du déverminage. La communication avec le PC est établie par l'intermédiaire des ports série « tppp » et « console » de la carte unifiée. Ces voies de communication permettent le transfert des programmes de test et l'exécution de fichiers de commande sur l'UB à tester (utilisation de la fonction « Kermit » de Linux pour le protocole de communication par les voies séries). Le Front End est testé par envoi de signaux sur ses entrées analogiques (amplitude 2 Volts, offset de -900 mV et fréquence 10 kHz). On vérifie durant ce test la bonne linéarité du signal acquis et donc de la présence de tous les bits par tracé des courbes. Tous les éléments sont testés : le slow control, les voies séries, le time tagging, le Front End et même le Led Flasher contrôleur pour lequel on observe ses signaux en sortie avec un oscilloscope.

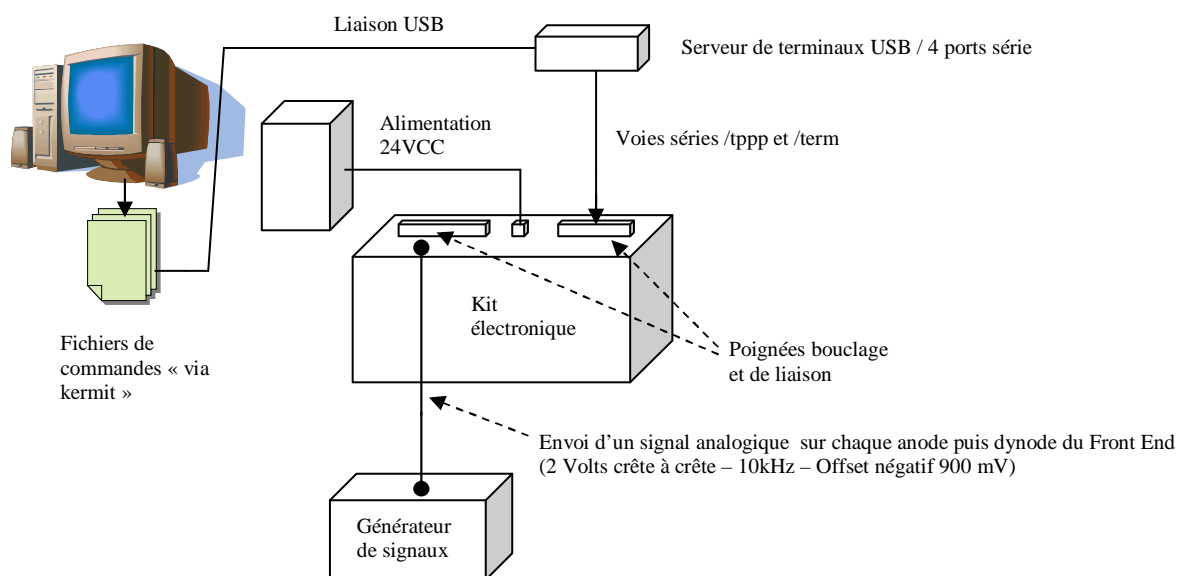


Figure 55 : Test complet des kits électroniques

L'utilisateur doit entrer son nom, et a le choix entre un test complet ou des tests partiels. Lorsqu'une intervention de l'opérateur est requise une information s'affiche à l'écran. Si une erreur est détectée, l'historique du test est alors affiché dont les résultats et commentaires sont sauvegardés dans des répertoires concernant chaque partie (FE, UB, radio, TPCB, Led Flasher, Kits). Pour les UB, par exemple, la structure de sauvegarde des résultats est organisée comme suit : /data/UB/UBxxx/ubxxx.dat avec xxx le numéro de la carte.

Un programme similaire a été développé pour le test des « kits complets » en situation réelle de fonctionnement sur la cuve de test. La vérification du fonctionnement du système est réalisée par l'envoi d'impulsions lumineuses dans la cuve à l'aide du Led Flasher contrôleur. Les résultats des tests et calibrations sont sauvegardés afin d'être analysés en cas de défaillance. Tous les équipements de tests peuvent être utilisés lors de l'intégration, mais aussi pour les besoins de maintenance.

Une journée dans la Pampa :

Avant de partir pour une longue journée de travail, il convient de n'oublier aucun matériel lors du chargement du 4x4. En effet, le temps minimum pour atteindre la zone des cuves sur lesquelles on doit travailler est de 1 à 2 heures (20 kilomètres minimum) en fonction des difficultés d'accès. En été par temps sec il est possible de visiter un maximum de 15 cuves par jour. L'orientation dans la Pampa est réalisée à l'aide de cartes du site et d'un système GPS. Par sécurité, il est interdit d'aller dans les champs à moins de 2 personnes (accident, panne, araignées venimeuses dangereuses...).



Photo 27 : Installation dans la pampa



Photo 28 : difficultés d'accès

Le travail et l'accès en hiver sont difficiles car 70% du terrain est recouvert d'eau.

Installation d'un ensemble électronique :

L'installation et le branchement de l'équipement sur la cuve préparée dure moins de 5 minutes. Il convient en premier lieu de vérifier les tensions des panneaux solaires et des



batteries. On connecte ensuite sur un port série un assistant numérique (Palm Pilot). Un programme de test et de calibration, spécifiquement développé est lancé et réalise :

- La vérification du bon démarrage du système
- L'initialisation du GPS et la recherche des satellites (programme automatique durant de 1 à 3 minutes)

Photo 29 : connexion de l'électronique

- La calibration automatique de chaque PMT (3 minutes)
- La vérification et l'enregistrement des données lues avec le slow control
- La vérification et l'enregistrement de tous les histogrammes des PMT dans le Palm Pilot
- L'envoi de paquets de données par envoi d'un message « echo » au CDAS et réception du numéro de station attribué par le CDAS lorsque la connexion est réussie (temps de première connexion de 3 à 5 minutes)
- C'est un programme espion (minispy) qui permet de suivre le fonctionnement du programme d'acquisition : fréquence des « triggers », état et nombre des messages envoyés au CDAS et reçus. Après avoir vérifié le bon fonctionnement de la station, on peut passer à la suivante...
- Le temps moyen d'installation et de test d'un ensemble électronique est de 20 à 30 minutes

Chaque action est lancée successivement par l'opérateur.

Suivi de l'état du réseau par Internet :

Un outil Internet développé par notre laboratoire permet de suivre l'état du réseau. Cet outil (Ls Status) offre un aperçu rapide du nombre de stations qui fonctionnent dans la pampa, les températures, tensions, signal moyen sur chaque PMT, triggers sur chaque station. Depuis le début du mois d'octobre 2003, avec plus de 100 cuves, l'observatoire Pierre Auger est le plus

grand observatoire de rayons cosmiques au monde. Une version plus complète du suivi de l'état du réseau par Internet vient d'être installée. Son nom est « Big Brother » ! Cette nouvelle version permet de visualiser en temps réel ou pour des dates choisies l'état de l'observatoire (conditions météorologiques, détecteurs de fluorescence, stations locales, CDAS, communications...). Il permet en particuliers d'accéder à toutes les informations concernant les stations locales : les mesures du slow control (tensions, températures, courants...), les déclenchements, les informations sur les cuves (nom, identification des cartes électroniques...), accès à la base de données et à « Bugzilla ». Des masques permettent d'afficher automatiquement les stations présentant un problème et nécessitant par exemple une intervention urgente, ou bien de visualiser des paramètres pour l'ensemble du site. Enfin, un autre outil Internet d'analyse permet de visualiser les évènements observés et les signaux sur chaque détecteur et donne une estimation de leur l'énergie et de leur direction. Il permet aussi de détecter et d'analyser certains mauvais fonctionnements de stations choisies.

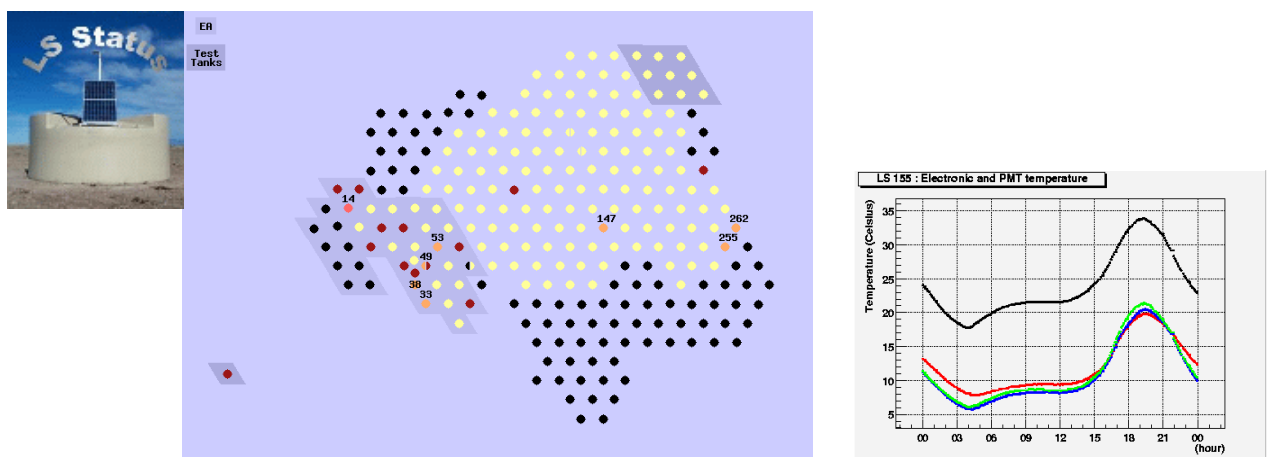


Figure 56 : LS Status (Exemple d'écran incluant le réseau prototype)

En jaune sur la figure 56, les stations en fonctionnement le 15 janvier 2004, en noir les stations sans électronique (80 stations sur 240), en rouge les stations hors service, en orange les stations en alarme. Dans les zones grisées : en bas à gauche, le réseau prototype, en haut à droite les cuves de test. La figure de droite est un tracé des températures des photomultiplicateurs et de l'électronique d'une station locale.

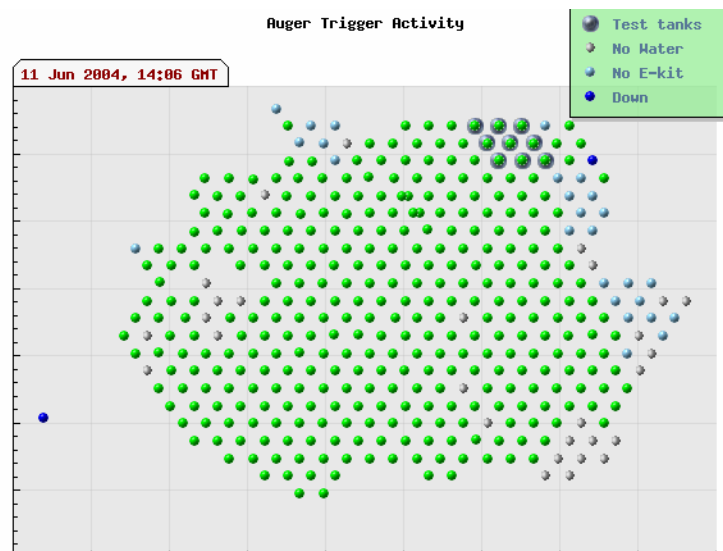


Figure 57 : La carte du site affichée par « Big Brother ». Les points verts représentent les stations en fonctionnement. En les sélectionnant on affiche leurs données.



Photo 30 : Inti-Hue envoie ses premières données... (Chaque cuve est baptisée. Beaucoup de noms ont été donnés par les enfants des écoles de Malargüe).

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

L'observatoire Pierre Auger se propose d'observer la manifestation des événements les plus violents de l'univers afin d'en découvrir les origines. La difficulté d'observation de tels événements de hautes énergies a conduit la communauté scientifique à proposer la construction d'un observatoire de très grande surface, en équipant un site de 3000 kilomètres carré minimum dans chaque hémisphère. De par sa taille gigantesque, cet observatoire est le plus grand au monde. Le choix des sites a été réalisé en tenant compte de nombreuses contraintes, géographiques, topographiques, économiques, politiques, d'infrastructures... Toutefois, la présence d'eau en hiver sur une grande partie de la Pampa, rend l'accès aux cuves difficile. Ces conditions, ainsi que la nécessité d'un fonctionnement permanent pendant 20 ans, ont imposé la recherche constante de la fiabilité à toutes les étapes du projet. Cette fiabilité, et la recherche de la maîtrise des coûts et des délais ont guidé en permanence la conception en particulier dans le choix des composants, le dessin de la carte unifiée et son intégration. L'évaluation de la fiabilité en elle-même est une démarche importante, riche d'enseignements. Cette étude a permis la mise en place des stratégies de maintenance, de prévoir les moyens, et les quantités d'éléments de rechange. La fabrication des cartes unifiées et le suivi de production constituent une part très importante du travail sur le projet. Là encore, de la constitution du dossier de fabrication, au choix de l'entreprise, de l'industrialisation de la carte à son test et son déverminage, ainsi qu'à la mise en place des démarches qualité, la recherche de la fiabilité a été et reste une préoccupation centrale. La calibration de la procédure de déverminage et l'étude de ses données et de ses résultats doit aussi apporter des informations très intéressantes en terme de fiabilisation de l'électronique. Cette analyse sera de plus utile à l'industriel qui pourra re-utiliser les protocoles validés pour des réalisations équivalentes et aura une meilleure connaissance du fonctionnement de son enceinte. Le suivi des cartes sur le terrain doit permettre l'acquisition d'un retour d'expérience très riche, qui nous sera utile non seulement pour ce site, mais aussi dans la perspective du site nord et plus généralement notre expérience peut être utile lors de la construction d'autres détecteurs. Dans ce cadre, nous avons présenté notre travail aux concepteurs de l'expérience « Antares » de détection des neutrinos de hautes énergies dont l'électronique est installée dans un environnement sévère en méditerranée par 2400 mètres de fond. En particulier, nous avons partagé notre expérience en fiabilisation, en gestion de production et de marché public.

Au delà de la fiabilisation et de la conduite de projet, l'étude et le développement du détecteur s'est révélée passionnante. L'approche système est très riche, en raison de l'intelligence

« embarquée » sur chaque détecteur et des nombreux paramètres à régler et prendre en compte de manière automatique ou en liaison avec le central d'acquisition lorsque c'est nécessaire (système distribué). En raison de la modification du calendrier abordé dans le chapitre 9, un travail complet de développement des algorithmes n'a pu encore être totalement finalisé. Toutefois, l'étude des triggers et de la calibration qui a été réalisée m'a permis de mieux connaître le détecteur, étape indispensable pour la mise au point et le dépannage de l'électronique. Une prochaine étape très intéressante en terme d'approche système, vise donc à participer aux réflexions sur les algorithmes de sélection des événements et sur la calibration. Ces algorithmes évoluant dans la première phase de fonctionnement d'un détecteur, l'expérience acquise sur ce site sud sera utilisée pour la conception de l'électronique du site nord (adaptation et modification des fonctions...). Le choix d'un composant programmable (FPGA) pour la partie d'acquisition « Front End » autorisera facilement des modifications des fonctions électroniques.

Très prochainement, doit être lancée une pré-étude pour la construction du site nord de l'observatoire Auger. Le choix géographique du site devrait être réalisé courant 2004 entre Milard County, non loin de Salt Lake City dans l'Utah et Lamar à 3 heures de voiture de Denver dans le Colorado aux USA. La majorité des composants actuellement utilisés sur la carte unifiée sont ou seront très prochainement obsolètes. De plus, l'électronique moderne, offre chaque jour des possibilités d'intégration accrues, pour des performances toujours plus grandes, une consommation et un coût réduit. Nous sommes candidats à la conception de l'électronique hors « Front End » pour le site nord qui s'appuiera toujours plus sur un système à intelligence distribuée. Cette nouvelle électronique s'orienterait autour d'un « System on Chip : S.O.C. » c'est-à-dire avec un processeur intégrant un maximum de périphériques. Deux solutions sont pour l'instant envisagées pour le cœur de ce nouveau système : l'utilisation du FPGA Xilinx Virtex II pro (cadençable à 350 MHz) ou d'un processeur Arm9 (Atmel) cadencé à 180 MHz avec une consommation de 0,5 mW par MHz. Ces deux solutions dites « SOC » proposent un certain nombre d'interfaces intégrées comme un port Ethernet, plusieurs ports RS232, un à trois ports USB, un port MCI et une petite zone de mémoire Flash Eeprom. Au moins 64 méga octets de SDRAM devraient être intégrés. Outre une mémoire Flash Eeprom présente sur la carte, il serait envisageable de connecter sur un des ports USB un élément de stockage électronique (256 Méga Octets de disque « dur » sur une « clé USB »). Le système d'exploitation utilisé serait un « Linux RT » (Linux Real Time). Pour le slow control, la communication avec le processeur serait réalisée à l'aide d'un bus série de type « I2C » ou « RS232 ». La solution utilisant un FPGA est intéressante pour sa flexibilité,

intégrant deux cœurs de Power PC elle permettrait de mettre en commun les compétences, en développant des plateformes similaires aux observatoires de fluorescence et de surface. Le temps de développement serait réduit par la possibilité d'utiliser des fonctions communes. En revanche, la solution utilisant un processeur ARM est avantageuse en terme de coût, de simplicité de mise en œuvre et de faible consommation. Cette solution pourrait être associée à un FPGA (« cyclone » ou équivalent) intégrant le marquage en temps et une partie numérique de sélection des signaux du Front End. La partie analogique du Front-End permettrait de réaliser un premier niveau de sélection des signaux, l'auto-calibration électronique des photomultiplicateurs et leur commande en tension, l'acquisition et le stockage des données dans des mémoires analogiques et la conversion numérique du signal. Cette partie que deux laboratoires français proposent d'étudier serait intégrée dans un ASIC mixte analogique et numérique. Au moment de l'écriture de ces lignes, nous proposons cette architecture utilisant un processeur ARM. C'est au final, l'ensemble de la collaboration, qui choisira parmi les projets proposés les solutions qui seront développées.

Des perspectives sur la recherche et le développement de photo détecteurs débutent actuellement à l'IN2P3. La conception d'un détecteur en réseau à intelligence distribuée de grande taille entre dans le cadre de ces recherches. De plus, une tendance nous conduit à développer des synergies avec les équipes de recherche sur l'environnement qui peuvent être intéressées par l'utilisation de réseaux installés par les physiciens pour la mise en place de leurs détecteurs.

Des projets d'observation des « RCUHE » depuis l'espace en observant le développement des gerbes dans l'atmosphère terrestre sont à l'étude. Citons par exemple le projet « EUSO » qui serait installé sur la station spatiale internationale. Ces détecteurs pourraient offrir une statistique accrue si leur faisabilité est démontrée et leur financement est accepté.

Le projet, cadre de ce mémoire m'a donné l'occasion de prendre part à de nombreuses activités qui relèvent des compétences et attributions des ingénieurs responsables de projet au CNRS :

- La participation à l'étude de systèmes « complexes » et leur intégration avec d'autres éléments
- L'acquisition de nouvelles connaissances en électronique et en programmation
- Le travail en collaboration avec les physiciens, et divers groupes de la collaboration internationale

- La publication de rapports d'avancement destinés à la collaboration et d'articles (un papier NIM sur la carte unifiée et un autre sur le détecteur sont en cours de réalisation)
- La rédaction de cahiers des charges
- La gestion de projet, la fiabilisation, la mise en place de démarches qualité, le suivi de production et la relation avec les industriels et les fournisseurs
- La participation à l'installation sur le site...

Au contact de personnes très compétentes, j'ai beaucoup appris durant ce projet. « L'aventure » ne fait que commencer, étant donné qu'il nous reste encore 1400 cartes à produire, et autant à installer dans la Pampa, à exploiter pleinement les données issues du retour d'expérience et préparer Auger Nord.

Enfin, le 21 mai 2004 avec un réseau de 320 cuves, on a probablement observé un des événements les plus énergétiques de l'histoire de l'étude des rayons cosmiques. Il a touché 34 stations et son énergie a été évaluée à $1,2 \cdot 10^{20}$ eV soit 120 Eev, et donc bien supérieure à la coupure GZK. C'est un très bon signe pour l'avenir !

ANNEXES



Une cuve au pied des Andes enneigées...

Annexes I : Calendrier de déroulement du mémoire

Mars 2004 : Fin de rédaction de la première version du mémoire et fin de production de la série C (300 cartes).

Décembre 2003 : Poursuite de la mise au point des bancs tests et de déverminage à la société LST.

Novembre 2003 : Meeting « Auger » à Malargüe et Production Readiness Review.

Octobre 2003 : Mission à Malargüe en Argentine pour la mise au point des procédures d'installation et de test sur le terrain et participer à l'installation de la série B des cartes unifiées. Surveillance de l'état des cartes.

Septembre 2003 : Mise au point du programme de commande de la « Powerbox » et préparation du « PRR ».

Juillet 2003 : Suivi de production des 120 premières cartes unifiées et mise au point des tests (livraison des cartes début Août). Correction des défauts pour la série suivante.

Avril à juin 2003 :

Etude de la réponse temporelle du slow control.

Participation à une école traitant des détecteurs en physique des particules.

Mission à Malargüe pour participer au test et à l'intégration de 5 premières cartes unifiées prototypes industriels et participation au montage des cuves.

Etude du Front End.

Février à avril 2003 :

Mise en place de la production des 10 premiers prototypes industriels,

évaluation de ces cartes et corrections des erreurs pour la série suivante.

Etude et conception de l'électronique de contrôle du banc de déverminage.

Octobre 2002 à janvier 2003 :

Modification de la carte unifiée pour son industrialisation.

Rédaction du dossier industriel, spécifications de fabrication et réunions avec LST...

Etude et mise en fabrication de la mécanique du banc de déverminage (Racks, poignées, câbles).

Avril 2002 à septembre 2002 :

Envoi des documents contractuels aux candidats retenus dans le cadre de l'appel d'offre de fabrication des cartes unifiées. Visite des candidats et choix de la société (LST).

Etude de la fiabilité des cartes unifiées.

Ecriture du plan qualité pour la production des cartes.

Suivi de la mise au point du banc de test fonctionnel et cahier des charges.

Avril 2002 : Mission à Malargüe et installation des premiers prototypes de la carte unifiée, maintenance de l'Engineering Array, montage et test des cuves et PMT.

Début du mémoire

Avant :

L'appel d'offre final a été lancé en janvier 2002, ce qui a impliqué la rédaction des documents contractuels.

Le « Design review » (revue de conception) de la carte unifiée s'est déroulé en décembre 2001.

Elaboration du cahier des charges du test fonctionnel en septembre 2001.

Choix des composants et conception de la carte unifiée durant l'année 2001.

Les années 2000 et 2001 ont été consacrées à la fabrication des cartes, à l'installation et la mise au point du réseau prototype.

Annexes II : Extrait du RDF 2000 et tableau de calcul de la fiabilité

CIRCUITS INTÉGRÉS	Spécification : CEI 60748
--------------------------	---------------------------

MODELE MATHEMATIQUE :

$$\lambda = \underbrace{\left[\lambda_1 \times N \times e^{-0,35 \times a} + \lambda_2 \right]}_{\lambda_{puce}} \times \underbrace{\left[\frac{\sum_{i=1}^y (\pi_i)_i \times \tau_i}{\tau_{on} + \tau_{off}} \right]}_{\lambda_{boitier}} + \underbrace{\left[2,75.10^{-3} \times \pi_\alpha \times \left(\sum_{i=1}^y (\pi_n)_i \times (\Delta T_i)^{0,68} \right) \times \lambda_3 \right]}_{\lambda_{surcharges}} + \underbrace{\left[\pi_I \times \lambda_{EOS} \right]}_{\lambda_{surcharges}} \times 10^{-9} / h$$

RENSEIGNEMENTS NECESSAIRES :

- (t_{ac})_i : température ambiante moyenne extérieure à l'équipement lors de la i^{ème} phase du profil de mission.
 (t_{ac})_h : température ambiante moyenne au voisinage des composants, là où le gradient de température s'annule.
 λ_1 : taux de défaillance de base par transistor de la famille du circuit intégré. Voir table
 λ_2 : taux de défaillance lié à la maîtrise de la technologie du circuit intégré. Voir table
 N : nombre de transistors du circuit intégré.
 a : année de fabrication - 1998.
 $(\pi_i)_i$: i^{ème} facteur de température lié à la i^{ème} température de jonction du profil de mission du circuit intégré.
 τ_i : i^{ème} pourcentage du temps de fonctionnement du circuit intégré à la i^{ème} température de jonction du profil de mission.
 τ_{on} : pourcentage du temps total de fonctionnement du circuit intégré. On a $\tau_{on} = \sum_{i=1}^y \tau_i$
 τ_{off} : pourcentage du temps où le circuit intégré est en stockage (ou en mode dormant). On a $\tau_{on} + \tau_{off} = 1$
 π_α : facteur d'influence lié aux différences de coefficients de dilatation entre le substrat de report et le matériau du corps du boîtier.
 $(\pi_n)_i$: i^{ème} facteur d'influence lié au nombre de cycles annuels de variation thermique vu par le boîtier, d'amplitude ΔT_i .
 ΔT_i : i^{ème} amplitude de variation thermique du profil de mission.
 λ_3 : taux de défaillance de base du boîtier du circuit intégré. Voir table
 π_I : facteur d'influence lié à l'utilisation du circuit intégré (interface ou non).
 λ_{EOS} : taux de défaillance dû aux surcharges électriques dans l'application considéré.

Structure technologique	Facteur de température π_i
MOS BiCMOS (basse tension)	$e^{\left[A \left(\frac{1}{328} - \frac{1}{273+t_j} \right) \right]}$ A=3480 ; (Ea=0,3 eV)
Bipolaire BiCMOS (haute tension)	$e^{\left[A \left(\frac{1}{328} - \frac{1}{273+t_j} \right) \right]}$ A=4640 ; (Ea=0,4 eV)
AsGa Numérique	$e^{\left[A \left(\frac{1}{373} - \frac{1}{273+t_j} \right) \right]}$ A=3480 ; (Ea=0,3 eV)
AsGa MMIC	$e^{\left[A \left(\frac{1}{373} - \frac{1}{273+t_j} \right) \right]}$ A=4640 ; (Ea=0,4 eV)

t_j = température de jonction en °C.

Circuits d'interface Valeurs typiques calculées			λ_{EOS} FIT	π_I
Fonction	Environnement électrique			
Interfaces	Informatique		10	1
	Télécommunication	commutation	15	1
		transmission, distribution, cartes d'abonnés	40	1
		équipements clients	70	1
		Ferroviaire, publicophone	100	1
		Avionique civile (calculateurs de bord)	20	1
Non Interfaces	Alimentations, convertisseurs		40	1
	Tout environnement électrique		-	0

Expression mathématique du facteur d'influence π_α	$\pi_\alpha = 0,06 \times (\alpha_S - \alpha_C)^{1,68}$
désaccord des coefficients de dilatation linéique entre substrat et boîtier	$ \alpha_S - \alpha_C $
α_S	Voir tableau 11
α_C	Voir tableau 11

Expression mathématique du facteur d'influence $(\pi_n)_i$	$n_i \leq 8760$ Cycles/an	$(\pi_n)_i = n_i^{0,76}$
	$n_i > 8760$ Cycles/an	$(\pi_n)_i = 1,7 \times n_i^{0,60}$
n_i : Nombre de cycles annuels d'amplitude ΔT_i		
Pour une phase on/off :	$\Delta T_i = \left[\frac{\Delta T_j}{3} + (t_{ac})_i \right] - (t_{ac})_i$	
Pour une phase fonctionnement permanent, stockage ou dormant	ΔT_i = moyenne par cycle de la variation de (t_{ac}) _i de la i ^{ème} phase du profil de mission.	

RÉSISTANCES FIXES À COUCHE À FAIBLE DISSIPATION HAUTE STABILITÉ (RS), D'EMPLOI COURANT (RC), " MINIMELF "

MODÈLE MATHÉMATIQUE

$$\lambda = 0,1 \times \left[\frac{\sum_{i=1}^y (\pi_i)_i \times \tau_i}{\tau_{on} + \tau_{off}} \right] + 1,4 \cdot 10^{-3} \times \left[\sum_{i=1}^j (\pi_n)_i \times (\Delta T_i)^{0,68} \right] \times 10^{-9} / h$$

RENSEIGNEMENTS NECESSAIRES :

$(t_{ae})_i$: température ambiante moyenne extérieure à l'équipement lors de la i^{ème} phase du profil de mission.

$(t_{ac})_i$: température ambiante moyenne au voisinage des composants, là où le gradient de température s'annule.

$(\pi_t)_i$: i^{ème} facteur de température lié à la i^{ème} température de couche du profil de mission de la résistance.

τ_i : i^{ème} pourcentage du temps de fonctionnement de la résistance à la i^{ème} température de couche du profil de mission.

τ_{on} : pourcentage du temps total de fonctionnement de la résistance. On a $\tau_{on} = \sum_{i=1}^y \tau_i$

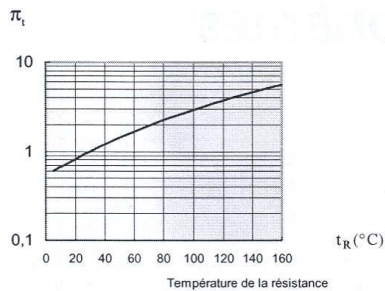
τ_{off} : pourcentage du temps où la résistance est en stockage (ou en mode dormant).

$(\pi_n)_i$: i^{ème} facteur d'influence lié au nombre de cycles annuels de variation thermique vu par de la résistance, d'amplitude ΔT_i .

ΔT_i : i^{ème} amplitude de variation thermique du profil de mission.

Puissance appliquée à la résistance.

Puissance nominale de la résistance.



Répartition des défauts	
Circuits ouverts	40%
Dérives	60%

Expression mathématique de π_t	
$\pi_t = e^{1740 \left(\frac{1}{303} - \frac{1}{273 + t_R} \right)}$	avec t_R = température de la résistance t_R = température ambiante $t_R = t_A + 85 \times \frac{\text{Puissance appliquée}}{\text{Puissance nominale}}$

Expression mathématique du	$n_i \leq 8760$	$(\pi_n)_i = n_i^{0,76}$
facteur d'influence $(\pi_n)_i$	$n_i > 8760$	$(\pi_n)_i = 1,7 \times n_i^{0,60}$
n_i : Nombre de cycles annuels d'amplitude ΔT_i		
Pour une phase on/off	$\Delta T_i = (t_{ac})_i - (t_{ae})_i$	
Pour une phase fonctionnement permanent, stockage ou dormant	ΔT_i = moyenne par cycle de la variation de $(t_{ae})_i$ de la i ^{ème} phase du profil de mission.	

Pour information :
Puissance appliquée à ne pas dépasser (puissance maximale)

Rapport : $\frac{\text{Puissance maximale}}{\text{Puissance nominale}}$

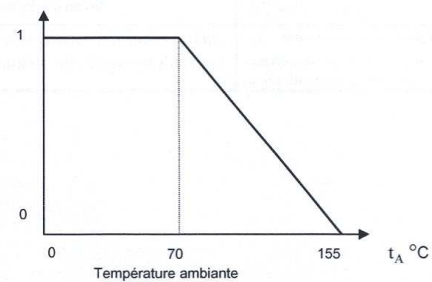


Tableau d'évaluation de la fiabilité de chaque composant et de la carte complète

Je présente toutes mes excuses au lecteur qui serait gêné par la non limitation du nombre de chiffres après les virgules.

Customer reference	Chip type	Qty / Brd	Failure rate (per billion hours)	Total failure rate	MTTF (per unit)	Identifica-tion in the B.O.M. (and function number)	Failure probability (at time = 20 years or 175200 hours)	Number of failures / 1600 boards	Spares components needed (for 1600 boards and spares repairing £ for 1830 boards)	Remark
Integrated Circuit										
74LCX138M	SOIC16	2	7,2168222	14,4336	138565142	M37 (8), M36 (14)	0,00252558	4,040927755	5	
74LCX245S	SOIC20 (SOIC wide 1.27 mm)	4	19,740665	78,9626	50656852	M9 (12), M45 (12), M35 (14), M99(14),	0,013739005	21,98240797	24	
74LCX32M	SOIC14	2	6,1079505	12,2159	163721036	M32 (9), M98 (132)	0,002137937	3,420699566	4	
IDT74LVCH16245APV	SSOP48	5	23,406338	117,031	42723469	M6, M7, M8 (12), M43 (14), M12 (11)	0,020295176	32,47228149	35	
IDT74LVCH16543APV	SSOP56	1	26,846169	26,8461	37249261	M34 (13)	0,004692405	7,507848045	9	
PI74LPT245AS	SOIC20 (300 Mills wide plastic SOIC)	4	19,740665	78,9626	50656852	M39 (4), M10 (11), M24 (95), M14 (12)	0,013739005	21,98240797	24	
LM78L05ACM	SOIC8 narrow	1	4,9158479	4,91584	203423705	M26 (1)	8,60886E-04	1,37741725	2	
ADR291GR	SOIC8	1	4,9478973	4,94789	202106054	M30 (142)	8,66496E-04	1,386393573	2	
AM29LV640DH90RZI	SSOP56	1	31,05181	31,0518	32204237	M5 (6)	0,005425506	8,680810148	10	Data retention >20 years
ASIC de Datation	CQFP64	1	30,416664	30,4166	32876714	M42 (10)	0,005314826	8,503721182	10	
DAC7625UB	SOIC28	1	21,12054	21,1205	47347274	M33 (142)	0,003693481	5,909569408	7	At 40 Deg.C - Ea=0.65eV
DS14C335MSA	SSOP28	3	78,653332	235,959	12714019	M4 (94), M19 (92), M31 (93)	0,04049734	64,79574475	70	
DS1818R - 10	SOT23	1	5,8991174	5,89911	169516882	M2 (4)	0,001032991	1,652786363	2	
ICM7242CBA	SOIC8	2	4,883768	9,76753	204759920	M22, M23 (2)	0,001709809	2,735694406	3	
LM2904M	SOIC8	3	7,4864969	22,4594	133573820	M21 (2), M38, M40 (143)	0,003927171	6,283473931	7	
LM335D	SOIC8	1	6,1150848	6,11508	163530028	M41 (141)	0,001070789	1,713262657	2	
IspM4A3-32/32-10JI	PLCC44	1	38,22111	38,2211	26163550	M1 (5)	0,006673968	10,6783494	12	
NEC D4265805G5-A50-7JD or SAMSUNG K4E640812E-TI-50 or HYUNDAI HY51V65803HGT-5 or GM71V65803CT-5 or	TSOP32 (TSOPII - 400 mil (1.27mm))	4	45,999146	183,996	21739533	M15,M16,M17, M20 (7)	0,031722154	50,75544686	55	

MICRON MT4LC8M8C2										
IBM25403GCX-3JC80C2	QFP160	1	85,79777	85,7977	11655313	M3 (4)	0,014919358	23,87097222	27	FIT=100 at 60 Deg.C
MAX1290BEEI	QSOP28	1	10,55061	10,5506	94781216	M29 (14)	0,00184676	2,954816252	4	
MAX4558ESE	Narrow SOIC16	3	6,990710	20,9721	143046971	M25, M27,M28 (1411, 1412, 1413)	0,003667576	5,868120852	7	
TL16C754BPN	PQFP80	1	28,86353	28,8635	34645794	M11 (9)	0,005044126	8,070602069	9	Ev =0.7; FIT=8.39 at 55 Deg.C
AT27LV010A-70JI	PLCC32	1	6,5920054	6,59200	151698904	M13 (61)	0,001154253	1,846804301	2	Rescue Prom - In use less than 10% (IC in stock=>FIT*0,5)
Diodes :										
LM4040AIM3-5.0	SOT23	1	2,174074	2,17407	459965780	DZ1 (141)				type of failure for diodes : Short Circuit : 70%, open circuit : 10%, Vzener shift : 10%
SMCJ33A	SMC	1	16,48151	16,4815	60674049	D3 (2)	0,002883396	4,613433107	5	
BAT54J	SOD232	2	2,281684	4,56336	438272609	D1, D5 (2)	7,99183E-04	1,278692602	2	
BYG20J	SOD106A	2	2,499092	4,99818	400145270	D2, D4 (2)	8,75299E-04	1,400477881	2	
Transistors :										
BC846	SOT23	1	4,2449998	4,24499	235571266	Q2(2)	7,43447E-04	1,189515979	2	
MTD2955V	DPAK	1	45,754488	45,7544	21855779	Q1 (mosfet -2 - Pmax =60 W - UB consumption max = 10W)	0,007984143	12,77462804	14	
DC-DC converters										
24 IPN10-03-UC	1 pouce x 2 pouces	1	666,7	666,7	1499925	PS1 (32), MTBF calculated at 40 Deg/C by manufacturer	0,110242068	176,3873091	201	
24KSC6-12-T01	DIL24	1	250	250	4000000	PS4 (31)	0,042854633	68,56741215	78	
24 ISC5-05-T	DIL24	1	250	250	4000000	PS3 (33)	0,042854633	68,56741215	78	
24 CPE3-0303-T	DIL24	1	232,6	232,6	4299226	PS2 (34)	0,039932342	63,89174732	73	
Condensators										
100 pF - 50 Volts	CMS 0805	4	1,8657765	7,46310	535969858	C27,C49,C52,C133	0,001306682	2,09069082	3	Short circuit : 70% Open circuit and drift : 30%

1 nF- 50 Volts	CMS 0805	5	1,8657765	9,32888	535969858	C54,C62,C63,C96,C129,C135	0,001633085	2,612936532	3	If a decoupling capacitor fails, and is in open circuit, this is not considered as a system failure; We need only to replace them if we see some decoupling problems
10 nF- 50 Volts	CMS 0805	56	1,8657765	104,483	535969858	C2-13,C15-26,C47-48,C64,C70,C74,C78,C90-91,C102-108,C118-120,C126-128,C130-132,C145-148,C150-153	0,018138979	29,02236624	33	Soldering failure is not considered as a system failure for decoupling capacitors. Decoupling failure could be seen only if several capacitors are in failure (signals are perturbed)
100 nF- 50 Volts	CMS 0805	55	1,8657765	102,617	535969858	C14,C28,C44-46,C51,C53,C57-58,C61,C65-69,C71-73,C76,C77,C79-89,C92-95,C97,C100,C109-117,C122,C124,C125,C134,C136-139,C149	0,017817972	28,50875476	33	
470 nF- 50 Volts	CMS 0805	18	2,6653950	47,9771	375178900	C29-43,C98,C99,C101	0,008370362	13,39257882	16	Implemented for pump charge and RC circuit
10 uF – 16 Volts	S35x28	6	0,1152	0,6912	868055556	C143(33),C144(31),C145,C146(34),C55(10),C60(92),C12(141),C123(142)	1,21091E-04	0,193745453	1	
10 uF – 16 Volts	S35x28	2	11,2	22,4	89285714	C139-C144	0,00391679	6,266862868	7	For 12 V decoupling

100 uF-10V	7.3x4.3 mm	2	2,7877816	5,57556	358708151	C50(2),C75 (33 & 14)	9,76362E-04	1,562178778	2	FU < 0,5; We use this formula because is more severous than the customer formula
150 uF – 6V3	7.3x4.3 mm	2	2,7877816	5,57556	358708151	C1,C142(31)	9,76362E-04	1,562178778	2	For tantale, 80% of failures are short circuit
Resistors										
10 K, 0.1%	CMS 0603	6	1,2685139	7,61108	788324032	R81,R89,R90,R92,R108,R111	0,001332573	2,132117049	3	
27K, 1%	CMS 0603	1	1,2685139	1,26851	788324032	R57	2,22219E-04	0,355550308	1	
33K, 1%	CMS 0603	2	1,2685139	2,53702	788324032	R33,R103	4,44389E-04	0,711021606	1	
100K, 1%	CMS 0603	8	1,2685139	10,1481	788324032	R9,R58,R100-102,R105,R114,R116	0,001776369	2,842191167	3	
1M, 1%	CMS 0603	3	1,2685139	3,80554	788324032	R56, R59, R113	6,66509E-04	1,066413912	2	
4,7	CMS 0603	2	0,5074055	1,01481	1970810081	R118-119	1,77779E-04	0,284446568	1	For resistors, failure repartition is : Open circuit :40% Shift : 60%
10	CMS 0603	6	0,5074055	3,04443	1970810081	R1,R70-72,R126,R141	5,33243E-04	0,853188007	1	A shift of the value of the resistor accross the time is not a problem for our application
33	CMS 0603	1	0,5074055	0,50740	1970810081	R14	8,88935E-05	0,142229606	1	
47	CMS 0603	7	0,5074055	3,55183	1970810081	R52-53,R60-61,R78-79,R139	6,22089E-04	0,995341769	2	
100	CMS 0603	3	0,5074055	1,52221	1970810081	R42,R112,R125	2,66657E-04	0,426650888	1	
1K	CMS 0603	18	0,5074055	9,13330	1970810081	R34,R43,R82,R87,R93,R99,R115,R121-124,R127-130,R136,R142,R143	0,001598875	2,558199394	3	
2K	CMS 0603	1	0,5074055	0,50740	1970810081	R85	8,88935E-05	0,142229606	1	
4K7	CMS 0603	10	0,5074055	5,07405	1970810081	R39,R47-51,R74-75,R77,R117	8,88580E-04	1,421727242	2	

10K	CMS 0603	61	0,5074055	30,9517	1970810081	R2-8,R10-13,R15-32,R37-38,R40-41,R44-46,R54-55,R66,R73,R83-84,R86,R88,R91,R94-98,R104,R107,R109-110,R120,R131-134,,R137,R140	0,005408068	8,652909119	9	
33K	CMS 0603	3	0,5074055	1,52221	1970810081	R64, R67, R76	2,66657E-04	0,426650888	1	
47K	CMS 0603	1	0,5074055	0,50740	1970810081	R63	8,88935E-05	0,142229606	1	
1M	CMS 0603	5	0,5074055	2,53702	1970810081	R62,R65,R68-69,R106	4,44389E-04	0,711021606	1	
1	CMS 1206	1	0,5074055	0,50740	1970810081	R80	8,88935E-05	0,142229606	1	
Connectors :										
Connecteur 34 points Harting 09185346324 ou Tyco 609-3427	HE10 mâle droit	1	10,97902	10,9790	91082799	J4(11)	0,001921676	3,074681198	4	
Harting 09185106324 ou Tyco 609-1027	HE10 mâle avec détrompeur	1	5,954210	5,95421	167948384	J8(93)	0,001042634	1,66821396	2	
Dubox 71991-307	Dubox	1	7,045116	7,04511	141942291	J24(13)	0,001233543	1,973668793	3	
Dubox 71991-305	Dubox	2	5,954210	11,9084	167948384	J5(11), J7(95)	0,00208418	3,334688584	4	
Picots dorés pour cavaliers	2 points au pas de 2.54mm	1	2,662803	2,66280	375544003	S9(2)	4,66414E-04	0,746263073	1	
Barette SIL	8 pts	1	5,325607	5,32560	187772001	J1 (5)	9,32611E-04	1,492178078	2	
Littelfuse 154.500	CMS	1	10	10	100000000	FUS1(2)	0,001750466	2,80074583	3	
EA0 Secme MC-12555-00	DIL	2	4,701819	9,40363	212683634	PU1(2),PU2(4)	0,001646161	2,633857664	3	
Grayhill 90HBW08P	SOIC12	1	28,21091	28,2109	35447272	SW1(4)	0,004930358	7,888572866	8	6 contacts used
39JR364-2	SMA-C	1	3,727925	3,72792	268245716	PX1(132)	6,52919E-04	1,044670834	2	
Tyco 1546109-2 ou 282813-2	DIL 5.08 mm pins spacing	1	2,662803	2,66280	375544003	J2(2)	4,66414E-04	0,746263073	1	
Harting 09032966845	DIN41612 type C	1	18,44844	18,4484	54205107	J6(111)	0,00322695	5,163119822	6	
Harting HD15S564T	DSUB15 HD	4	7,292388	29,1695	137129281	J21,J22,J23 , J25 (1411,1412,1413)	0,005097469	8,15595115	9	

DSUB9 femelle coudé - ref : 09661525611	DSUB	1	5,648659	5,64865	177033141	J9(92)	9,89156E-04	1,582649075	2	
DSUB9 mâle coudé - ref : 09661625811	DSUB	2	5,648659	11,2973	177033141	J3(94), J10(92)	0,001977333	3,163732665	4	
Oscillators :										
HG-8002DC100.0000M-PCAV		1	50,57576	50,5757	19772314	OSC3 (10)	0,008821733	14,1147726	15	
K3750 HAAE-40.000MHz	CMS 7x5mm	1	50,57576	50,5757	19772314	OSC4 (15)	0,008821733	14,1147726	15	
K3750 HCE-7.3728MHz	CMS 7x5mm	1	50,57576	50,5757	19772314	OSC5 (16)	0,008821733	14,1147726	15	
Other :										
Cooper Bussmann 0805ESDA-TR1, SurgX ESD Suppressor	CMS 0805	5	1,2	6	833333333	SX1, SX3, SX4 (92), SX2 (132), SX5 (2)	0,001050648	1,681036293	2	
Raidisseur 12x1 pouce	12x1 pouce	1	0	0		J11				
Circuit imprime de la carte electronique		1	142,2726	142,272	7028756		0,02461808	39,38892761	Pas de « spares » : défauts de soudure réparables dans 90 % des cas Si défaillance dans le circuit lui-même, pas de réparation possible	

TOTAL	3407,92	293433	0,4496	719,32
--------------	----------------	---------------	---------------	---------------

Table I : Failure rate for each components and the whole board

10% majoration : (lighting, ESD,human fault...)

Unified Board MTBF (hours) :	266757,84	UB MTBF (years):	30,45	Total failure rate for a single board :	3748,72	Total failure distribution for a single board :	0,482	Total number of failures over a 20 years period :	770,37	3,21 failures by month
-------------------------------------	------------------	-------------------------	--------------	--	----------------	--	--------------	--	---------------	-------------------------------

Failure rate corresponding to not replaced components 233,5087

Stocked spares in failures over 20 years (Failure in stocking=0,2*normal FIT) 21,02

Quantity of unrepared spares in stocking : 4,21

Spares for unrepaired board (20%) :	154,1	Spares boards quantity for unreplaced items :	64,2
-------------------------------------	-------	---	------

Spares board total quantity needed :	218,209701 donc 219
--------------------------------------	---------------------

For information, spares quantity for 6 mounth time to repair :	26,1
--	------

Temp ambiante :	40
Temp max variation :	25

Table of boards failures during deployment and site life :						
Period	T1=T0+(12 weeks)	T2=T1+(14 weeks)	T3=T2+15 weeks	T4=T3+20 weeks	T5=T4+20 weeks	T5=240 mounths
Installation in the field		120	300	500	400	270
Cumul UB installed		130	430	930	1330	1600
Hours added	20160	325920	1409520	453432	9003120	289323120
Failures quantity	0,112721	1,70799	4,931062	17,7767	17,828292	802,096689
Unrepaired boards (including not replaced components)	0,029603	0,54088	1,522830	5,01165	4,2941814	228,281845

Total spares needed	240	(Including deployment period) (somme des spares utiles pendant la vie de la carte et le déploiement)
Failure rate due to components packages in FIT	741,236744	(e.g. soldering, bounding)

<u>And for information:</u>	Number of package failures (soldering, bounding...) over 20 years for 1600 boards :	194,857176
-----------------------------	---	------------

Table 2 : boards failures during deployment and site life

For information :

Our production is : 1600 boards + 230 spares + 50 "parallel path" (Pen State), then total UB spares equal 280.

For the 130 first UB we consider that the failure rate is equal to the base failure rate multiplied by 1.5, and for the next 300 UB, we consider that the failure rate is equal to the base failure rate multiplied by 1.1.

Note that the calculation of spare component needed to replace components in failure include spare board number in stock.

Annexes III : Extraits de programmes et fichiers de test

Extraits du programme d'étude de la réponse du slow control (cf 4.2.3.):

```
#include <stdio.h>
#include <types.h>
#include <signal.h>
#include <stdlib.h>
#include <errno.h>
#include "sctest.h"
FILE *sfile;
int menu( void);
void AdcList( void);
float listOneAdc( int adcNum);
float listOneAdcmo( int adcNum, int
modticks, int adcticks);
void listAllAdcs( void);
void AdcStability( void);
void DacList( void);
int readInt(char *str, int def, int min,
int max);
void pto( void);
unsigned short readOneAdc( int adcNum);
float convertOneAdc( int adcNum, unsigned
short value);
void DacInit( void);
unsigned short readOneDac( int dacNum);
void writeOneDac( int adcNum, unsigned
short value);
void tf(void); /*sc transfer function
study*/
unsigned short readOneAdcmo( int
adcNum, int modticks, int adcticks);
int nLoops= 1;

void main( int argc, char *argv)
{
    int opt, n;
    int adcNum= 1, dacNum= 3;
    float val, minVal, maxVal;
    unsigned short dacVal;
    char s[100];
    DacInit();
    while( opt= menu()) {
        switch( opt) {
            case 1: AdcList(); break;
            ...
            case 10: /* Write all DACs */
                for( n=0; n<4; n++) {
                    sprintf( s, "---> DAC#%d value ", n);
                    dacVal=readHex( s, readOneDac( n), 0,
                    0xFFFF);
                    writeOneDac( n, dacVal);
                }
                break;
            case 11: /*tf study*/
                tf();
                pto();
                break;
        }
    }
}

int menu( void) /*partiellement détaillé*/
{
    int opt=0;
    printf( "\t0 - Exit          Wait for
Mux : %d ms\n", 10*SC_WAIT_TICKS);
    puts( "");
    puts( "\t1 - List ADCs");
    ...
}
```

```
puts( "\t11 - trace the response time for
slow control mux and ADC");
opt= readInt( "\nYour choice", opt, 0, 12);
return opt;
}

...
int readInt(char *str, int def, int min,
int max)
{
    int ret;
    char s[100];
    while( 1) {
        printf( "%s [%d] : ", str, def);
        fgets( s, 90, stdin);
        if( strlen( s) == 1) return def;
        ret= atoi( s);
        if( ret >= min && ret <= max) return ret;
        printf( "NO ! min= %d - max= %d ... Try
again\n", min, max);
    }
}

...
/*C'est la fonction tf() qui réalise la
mesure de la réponse du slow control - Les
fonctions liées ne sont ici pas
détaillées*/
void tf()
{
    int adcNum, n, dacVal, modticks, adcticks;
    unsigned short value;
    char s[100];
    /*faire la lecture en boucle en changeant
modticks et en remettant a zero entre
chaque modif de modticks */
    /*write all dac's */
    for( n=0; n<4; n++) {
        sprintf( s, "---> DAC#%d value ", n);
        dacVal=readHex( s, readOneDac( n),
        0, 0xFFFF);
        writeOneDac( n, dacVal);
    }
    /*list all adc modified*/
    for( modticks=0; modticks<50; modticks++)
    {
        printf( "modticks = %d ", modticks);
        /*pto();**/reponses en fonction du temps
de stabilisation des mux*/
        for( adcticks=0; adcticks<3;adcticks++){
            printf("adcticks = %d ", adcticks);
            /*pto();**/reponses en fonction du temps
de conversion de l'ADC, dans un premier
temps sans attente puis avec attente
largement superieure a attente necessaire*/
            writeOneDac( 0, dacVal);
            /*ecrire 0 dans les DAC*/
            writeOneDac( 1, dacVal);
            /*ecrire 0 dans les DAC 0 à 3*/
            ...
            printf("dacval%d\n", dacVal);
            /*enregistrer dans un fichier
response.log*/
            sfile=fopen("response.log", "a");
            fprintf(sfile," Ecriture valeur #%d dans
le DAC. Resultat :\n", dacVal);
            fclose(sfile);
            for( adcNum=0; adcNum<SC_ADC_NB;
adcNum++) listOneAdcmo( adcNum, modticks,
adcticks);/*lire les valeurs*/
            /*write all dac's with 0 */
            writeOneDac( 0, 0); /*ecrire
0 dans les DAC 0 à 3*/
            ...
            sfile=fopen("response.log", "a");
}
```

```

    fprintf(sfile, " Mise a zero des DAC,
resultat : \n");
    fclose(sfile);
    for( adcNum=0; adcNum<SC_ADC_NB; adcNum++)
    listOneAdcmod( adcNum, modticks, adcticks);
    /*lire les valeurs*/
    /*write all dac's */
    /*for( n=0; n<4; n++) {
    sprintf( s, "---> DAC#%d value ", n);
    writeOneDac( n, dacVal);}*/
    }
    /*printf("/n resultat dans le fichier
response.log /n");
    pto();*/
    }

```

Extrait du programme de contrôle de la « powerbox » (cf chapitre 8) :

Les déclarations :

```

#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <unistd.h>
#include <errno.h>
#include <dirent.h>
#include <sys/types.h>
#include <string.h>
#include <time.h>
#include <sys/times.h>

```

```

#include "hardware.h"
...

```

Régulation des sorties DAC et mesure des entrées ADC :

```

int main (int argc, char *argv)
{
    clock_t start, stop, diff = 0;
    float vset, vapply, erreur, v, i, t, coefcor, coefread, vread;

    if(CheckParport() != PP_NOERR)
    {
        printf("Impossible de faire fonctionner le port
parallèle.\n");
        printf("Vérifiez votre hardware.\n");
        exit(1);
    }

    InitBox();
    printf("clkck %d\n", CLK_TCK);
    system("sleep 2");
    PowerOn();
}

```

```

scanf(%f, &vset);

```

```

Vapply=(vset+0.825)/1.05
/*avec Vapply représente Vconvertisseur et Vset représente
Vmesurée*/
/*Les paramètres de la fonction ci-dessus ont été calculés en
observant que pour 10V voulu on a 9.7V en sortie du CNA,
soit 0.97V par volt voulu et 25.5V pour 25V soit 1.02
Volts par volt voulu*/

```

```

/*Une autre méthode consiste à calculer un coefficient déterminer
à partir de l'écart aux valeurs donc à la fonction attendues*/
Ainsi pour avoir la pente de ce coef on pose: (1.02-
0.97)/15=0.0033 et on a 9.7V pour 10V réglé donc on en déduit
0.97-0.0333=0.9367 qui est le second paramètre, donc
coefcor=0.0033*vset+0.9367*/
/*on peut enfin déterminer vapply = vset/coefcor; la valeur a
appliquer est Vset/coefcor. Exple : on veut 10 :
10/0.97=>10.31V */

```

```

SetVoltage(vapply);
SetCurrent(5); /*regler le courant maxi a 5 amperes*/
v = ReadVoltage();
i = ReadCurrent();
t = ReadTemp();

```

```

Vread=1.05v-0.825

```

```

/*Avec Vread la valeur réelle mesurée (Vmesurée) que l'on
recherche et v la valeur de tension en lecture donnée par le
convertisseur (Vconvertisseur)*/

```

```

/* Autre méthode de lecture : même principe de coefficient avec
la lecture :

```

```

coefread = 0.0033*v+0.94; /*correction du coef de lecture en
fonction de la valeur lue*/

```

```

/*vread = v / coefread; /*correction de la lecture*/

```

```

/*note : on peut aussi imaginer un programme de calibration
automatique demandant la valeur réelle lue
et corrigeant ainsi l'écriture et la lecture*/

```

```

if(v != -1)
    printf("V = %4.2f V\n", v);
if(vread != -1)
    printf("Vread = %4.2f V\n", vread);
erreur = vapply - vread;
if(-0.1<erreur<0.1) /*le pas de quantification est de
0.12V sur 28.7V. On pourrait au plus fin faire lsb/2 soit
0.06V*/
    continue;
else vapply = vapply + erreur; /*regulation*/
SetVoltage(vapply);

```

```

...}
...
return 0;
}
...

```

Extrait du programme d'intégration et exemple de fichier de test (cf chapitre 10) :

PruebaUB : lance le fichier de commande Integ avec Kermit (PruebaUB est lancé par un programme classique gérant le menu des tests « UBprueba.c » non présenté ici)

```

#!/bin/bash
cd /home/sde/TestProgs/Integ
#killall -TERM xemacs

```

```

TotalCheck() {
killall -TERM gnuplot_x11
AUTO=no
export AUTO
export UBnumber
export version
export informations
}
echo " "

```

```

echo "Bienvenido en la prueba automatica del UB"

```

```

echo " "
echo " "
echo "Please enter the UB number - Por favor, entrar el numero
de UB"
echo " "
read UBnumber

```

```

rm -f cpunumber.out
kermit -y getcpunb >cpunumber.out

```

```

sed -e '1,$s/\r\n/g' cpunumber.out >/tmp/cpunumber.out
CPUNB=`grep NUmber /tmp/cpunumber.out | sed -e
's/CpuNUmber: /'`

```

```

if [ "$CPUNB" = "$UBnumber" ]
then
    CPUNUMEROK=YES

```



```

else
echo
*****
***
echo '**          BAD UB NUMBER          **'
CPUNUMBEROK=NO
echo "***** UB nb: $CPUNB - you said:$UBnumber"
read -p "Type anything to restart the test: " goon
exit 1
fi

cd data
mkdir -p /home/sde/TestProgs/data/UB/UB$UBnumber
cd /home/sde/TestProgs/data/UB/UB$UBnumber
echo "-----"
echo "List of test already existing for this UB - lista de las
pruebas realizadas por esta UB : "

ls
echo "-----"
echo " "
echo "Please enter the version of this test - Version de esta nueva
prueba (a,b,c,...)?"
echo " "
read version

RESULT_FILE=/home/sde/TestProgs/data/UB/UB$UBnumber/
ub$UBnumber$version.dat

echo " "
echo "Please wait - Por favor espera que el programa recuerda las
informaciones"
echo "If processing time is more than 1 minute this mean a bug
have occur then make ctrl c for exit, and reboot the process..."
rm /home/sde/TestProgs/Integ/result

xterm -e kermi -y /home/sde/TestProgs/Integ/integ

bunzip2 /home/sde/TestProgs/Integ/result.bz2

mv /home/sde/TestProgs/Integ/result $RESULT_FILE
echo "Fecha de prueba :">> $RESULT_FILE
echo "-----">> $RESULT_FILE
date>> $RESULT_FILE
cat /home/sde/TestProgs/Integ/userstest>> $RESULT_FILE
echo " ">> $RESULT_FILE
echo " ">> $RESULT_FILE
echo "-----">>
$RESULT_FILE
echo "Comments :">> $RESULT_FILE
echo " ">> $RESULT_FILE
echo "-----">>
$RESULT_FILE

*****
****
echo '**          **'
if grep -q BAD $RESULT_FILE
then
    ISBAD=YES
echo '**          HAY PROBLEMAS          **'
else
    ISBAD=NO
echo '**          FUNCTIONA BIEN          **'
fi
echo '**          **'
echo
*****
****
echo "Comments? Enter to finish"
echo "-----"
echo " ">>$RESULT_FILE
read informations
echo $informations>>$RESULT_FILE
echo " "
echo "-----"
echo " "

if [ "$ISBAD" = "YES" ]

```

```

then
xemacs $RESULT_FILE

echo "-----"
echo "The path of this test file is - La direccion del archivo de
prueba es en : "
echo " "
cd /home/sde/TestProgs/data/UB/UB$UBnumber
pwd
ls
echo " "
echo "-----"

Extrait du programme INTEG:

OPEN APPEND /home/sde/TestProgs/Integ/integ.log

cd /home/sde/TestProgs/Integ

set line /dev/ttyUSB1
set carrier-watch off
set speed 9600

:login_start
lineout
input 10 AugerUB :
if fail {
    lineout
    input 30 User name?:
    lineout super auger
    input 30 AugerUB
}
#write file answ=$AugerUB :
#if fail goto login_start

pause 4

write file STOP ACQ:
lineout stop -2 control
input 10 AugerUB

lineout show POWERON
input 10 AugerUB
lineout

lineout mshell
input 10 AugerUB

lineout ubid>+result
input 10 AugerUB

lineout gps_sn>+result
input 10 AugerUB

# US UB have an old oreboot'where the content of /rom7 is
mixed-up with
# ROM-RAM
# one should load by hand the latest version of scadc/scdac/etc...
lineout fixmod -ua=8003 scadc scdac gpsiotest ttagest
input 10 AugerUB
fixmod -ua=a003 gpsirqt
input 10 AugerUB
lineout load -d scadc scdac gpsirqt gpsiotest ttagest
input 10 AugerUB

lineout echo "ADC reads :">+result
input 10 AugerUB
lineout echo "-----">+result
input 10 AugerUB
lineout scadc -a0 -vv>+result
/*Affiche la valeur*/
input 10 AugerUB
lineout scadc -a0 -c2700 -d150>+result /*ligne de commande
lançant avec des options le programme scadc de lecture des adc
sur l'UB. On indique dans la ligne de commande, la valeur
attendue et la tolérance acceptée. Les resultats sont enregistrés
dans un fichier result rapatrié sur le PC ensuite par le fichier de
commande UBprueba */

```

```
/*Test la valeur pour vérifier si elle est bien comprise dans les
tolérance. Renvoie « Ok » si le test est bon*/
/*la même opération est réalisée en adaptant les tolérances
pour les entrées a1 à a4, a10, a13 à a15, a18, a22, a27, non
détaillé ici*/
input 10 AugerUB /*permet d'attendre que l'UB rende la main
au programme*/
Bouclage DAC/ADC :
```

```
lineout echo "DAC ADC loop - Caps need to be connected
:>+result
input 10 AugerUB
lineout echo "-----
">+result
input 10 AugerUB
lineout echo "DACPMT1 TEMPPMT1 :>+result
input 10 AugerUB
ECHO \10
lineout scdac -f -d DACPMT1 -a TEMPPMT1 -s -e 5 -b
64>+result
input 10 AugerUB
ECHO \10
/*Idem avec CURPMT1...
/*et realisation des mêmes boucles CAN/CAN pour les deux
autres connecteurs PMT (non détaillé ici) et extension*/
...
```

Test time tagging (le module GPS doit être connecté):

```
lineout ttagtest -c -vv>+result
input 10 AugerUB
pause 3
lineout echo "gpsiotest">+result
input 10 AugerUB
lineout gpsiotest>+result
input 10 AugerUB
pause 3
```

Test des voies series :

```
lineout echo "siotest -d /tsu">+result
input 10 AugerUB
lineout siotest -d /tsu>+result
input 10 AugerUB
lineout bzip2 result
input 10 AugerUB
lineout kermi si result.bz2
receive
lineout del result.bz2
input 3 online
lineout reboot
input 10 online
CLOSE WRITE-FILE
pause 2
exit 0
```

Présentation d'un fichier de résultat de test :

```
CpuNumber: 297
GPS: using /tgps as GPS serial port.GPS_SN: GPS Receiver ID
string:
Cj
COPYRIGHT 1991-1997 MOTOROLA INC.
SFTW P/N # 98-P36848P
SOFTWARE VER # 3
SOFTWARE REV # 2
SOFTWARE DATE Aug 23 2000
MODEL # R5122U1115
HWDR P/N # 446700002363
SERIAL # 446700002363
MANUFACTUR DATE 9/27/02
```

ADC reads :

```
-----
0 - 3V : 3.33 Volts [2724 - $AA4] (0.019 ms)
OK
1 - 5V : 5.11 Volts [2092 - $82C] (0.019 ms)
```

```
OK
2 - 12V : 11.91 Volts [2439 - $987] (0.019 ms)
OK
3 - BATT : 19.78 Volts [1473 - $5C1] (0.019 ms)
BAD
4 - TEMP : 38.36 Celsius [2550 - $9F6] (0.019 ms)
Multiplying bu 2 the next value and subtracting the read value
from the 5 Volts to obtain the real value for the savanam
ie the -3V3 power supply :
10 - SCVANAM : 0.87 Volts [ 715 - $2CB] (51.031 ms)
OK
The next value is a read back by the caps if connected of the 3V3
by PM1HT ADC :
13 - PMT1HT : 3.31 Volts [2712 - $A98] (23.206 ms)
OK
14 - MSC12V : 11.90 Volts [2436 - $984] (52.624 ms)
OK
15 - MSU12V : 11.85 Volts [2427 - $97B] (52.748 ms)
OK
The next value is the read back of 3V3 analogic section :
18 - SCVANAP : 3.32 Volts [2716 - $A9C] (27.169 ms)
OK
the next value is a read back by the caps if connected of the 3V3
by PM3HT and PMT2HT ADC :
22 - PMT3HT : 3.31 Volts [2711 - $A97] (30.300 ms)
OK
27 - PMT2HT : 3.31 Volts [2712 - $A98] (32.669 ms)
OK
```

```
-----
DAC ADC loop - Caps need to be connected :
```

```
-----
DACPMT1 TEMPPMT1 :
```

```
OK
DACPMT1 CURPMT1 :
OK
```

```
...
/*Affichage de même type pour toutes les autres boucles testées
(non détaillé ici)*/
```

```
>>>>> TTAG Test
```

SUMMARY

```
-----
100MHz : [1] Moyenne: 99.99952489 MHz - Min: 99999524,
Max: 99999525 (9)
40MHz : [6] Moyenne: 39.99980733 MHz - Min: 39999807,
Max: 39999808 (9)
Bits Usage: *****111111111111111111111111 All bits
flipped
No Error
OK
```

```
<<<<< TTAG Test
```

```
gpsiotest
OK
siotest -d /tsu
OK
Fecha de prueba :
```

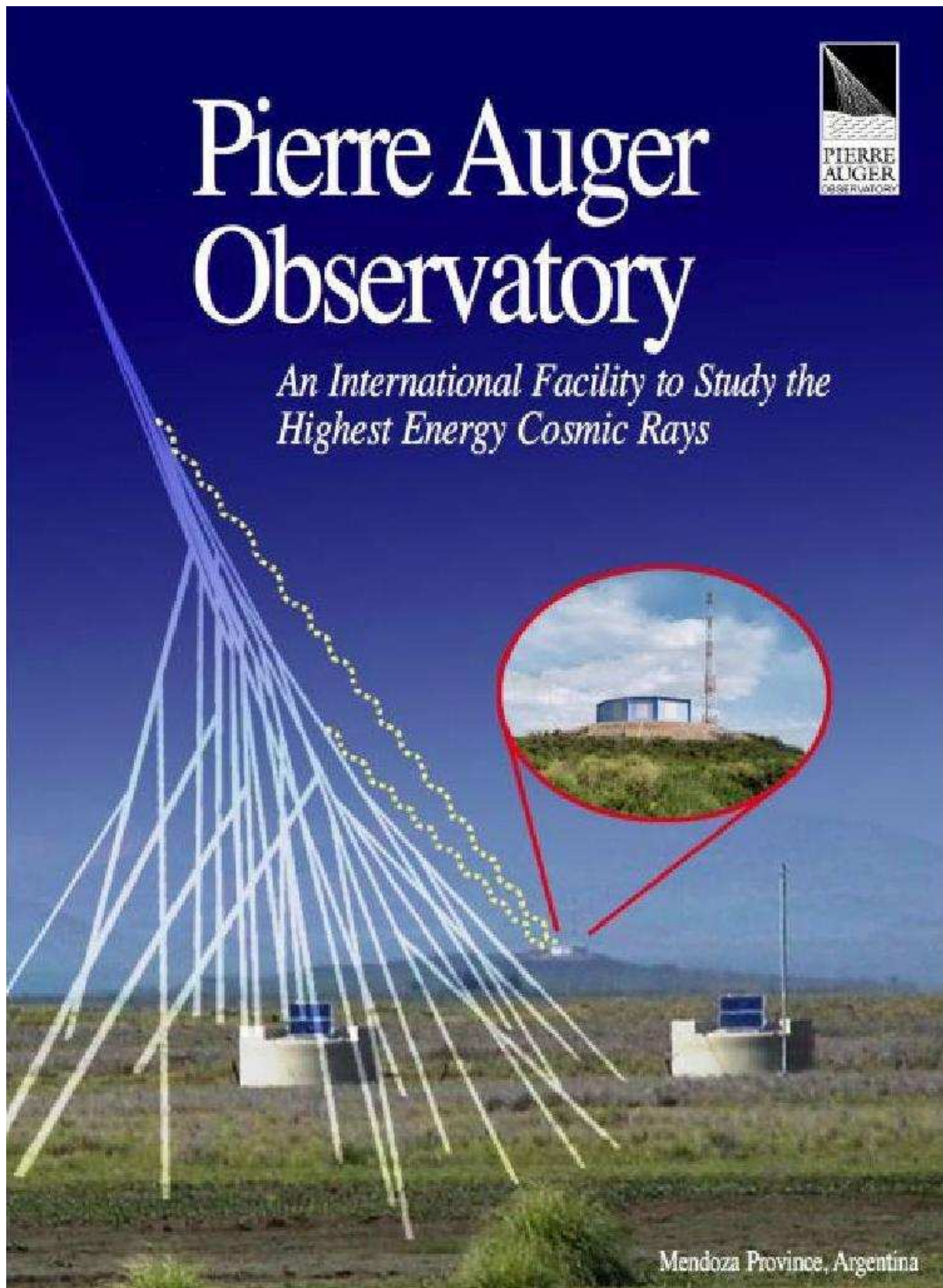
```
-----
Wed Oct 29 16:27:28 ART 2003
Test proceeed by : Marcos
```

```
-----
Comments :
```

Commandes Matlab élémentaires :

Pour mémoire, la commande utilisée pour tracer les courbes dans Matlab est :

```
» figure=[input, simout, tempcartes]
» plot(figure)
```



Annexes V : Coût des cartes unifiées

Détails concernant le coût de la fabrication des 1830 cartes avec l’approvisionnement des composants:

	Montant total	Quantité	Coût unitaire 1830 cartes
Offre LST (Fabrication et approvisionnements)	450.719,43 €HT	1830	246€30
Eléments achetés par CDF :			
Power PC	44000 €HT	2000	22 €
Convertisseurs DC/DC (achat sur 2 ans : mise en concurrence simple)	168 000 €HT	2000	84 €
Asic Time Tagging	64 000 €HT	2000	32 €
Raidisseurs	4 000 €HT	1830	2 €
Surgix + divers composants série A	5000 €HT		
Licenses OS9000	52 000 €HT	2000	26 €
Transport 745€/palette de 8 cartons soit 144 cartes	9685 €HT	13palettes 1800 UB	5,4 €
Avenants sur fabrication - évolution indices prix : estimation 8%	36058 €HT	1830	19,7 €
TOTAL	833 462 €HT	1830	455 € 45

La TVA n’est pas prise en compte (Automatiquement dégrevée : recherche publique).

Liste des Abréviations et des notations

ASIC: Application Specific Integrated Circuit

BGA : Ball Grid Array

BSU: Base Station Unit (Module radio communicant avec 80 stations)

Bugzilla : Outil Internet de recueil des problèmes rencontrés sur les détecteurs ou les logiciels

CAN : Convertisseur Analogique Numérique (ADC: Analog to Digital Converter)

CAO: Conception Assistée par Ordinateur

CDAS: Central Data Acquisition System (Système central d'acquisition des données)

CDF: Collège De France

CERN: Centre Européen de Recherche Nucléaire

CMS : Composant Monté en Surface

CNA : Convertisseur Numérique Analogique (DAC: Digital to Analog Converter)

CNRS: Centre National de Recherche Scientifique

CPU: Control Process Unit (Processeur)

DC: Direct current (courant continu)

DMA: Direct Memory Access

DRAM: Dynamic RAM (Mémoire vive dynamique)

EA: Engineering Array (Réseau prototype)

EEPROM: Electrically Erasable PROM

EPP: Extended Parallel Port

FE: Front End

Fermilab : Important laboratoire de recherché en physique des particules à Chicago (USA)

FIFO : First input, First output (La première donnée entrée en mémoire est la première sortie)

FPGA: Field Programmable Gatte Array

GPS: Ground Positioning System (Système de positionnement utilisant des satellites)

ICRC: International Cosmic Ray Conference

IN2P3: Institut National de Physique des Particules et de Physique Nucléaire

LAL : Laboratoire de l'Accélérateur linéaire

LF: Led Flasher

Linux: Système d'exploitation (tout comme Windows ou Mac OS...)

LPCC: Laboratoire de Physique Corpusculaire et Cosmologie

LSB : Least Significant Bit (contraire de MSB : Most Significant Bit)

LST: Loire Sous-Traitance (Société en charge de la fabrication de l'UB)

MTBF: Mean Time Between Failure (Temps Moyen Entre Défauts)
 MTTF: Mean Time To Failure (Temps Moyen Avant Défaut)
 MTU : Michigan Technology University
 PAO: Pierre Auger Observatory
 PC: Abréviation courante pour parler d'un ordinateur
 PLD: Programmable Logic Device (Composant Logique Programmable)
 PMT ou PM: Tube Photomultiplicateur
 PROM: Programmable Read Only Memory
 RCUHE: Rayons Cosmiques d'Ultra Haute Energie
 SC: Slow Control
 (T)SU: (Terminal) Subscriber Unit (radio sur le détecteur)
 TIS: Test In situ
 TPCB: Tank Power Control Board
 TPS : Tank Power System
 UB: Unified Board (Carte Unifiée)
 UHECR: Ultra High Energy Cosmic Rays
 VEM: Vertical Equivalent Muon (Muon Vertical Equivalent)

Les notations :

L'électron Volt : 1 eV est une unité d'énergie équivalent à $1,6 * 10^{-19}$ joules. C'est l'énergie d'un électron soumis à une différence de potentiel de 1 volt.

1 MeV (1 Méga électrons Volts) : 10^6 eV

1 GeV (1 Giga électrons Volts) : 10^9 eV

1 TeV (1 Téra électrons Volts) : 10^{12} eV

1 PeV (1 Péta électrons Volts) : 10^{15} eV

1 EeV (1 Exa électrons Volts) : 10^{18} eV

1 ZeV (1 Zeta électrons Volts) : 10^{21} eV

1 muon est une particule élémentaire ayant une charge électrique positive ou négative égale à celle de l'électron et dont la masse vaut 207 fois celle de l'électron.

Fréquences :

Mbps : Millions de bits par seconde

Kbps : Milliers de bits par seconde

GHz : Giga Hertz

MHz : Méga Hertz

Bibliographie

Gap notes (rapports d'avancement) de la collaboration Auger :

- [1] AYNUTDINOV V, BRUNET J-M., COLONGES S., COURTY B., GENOLINI B., KOMPANIETS K., ROOM D., POUTHAS J., SUOMIJÄRVI T., TRISTRAM G., Control system for LED Flasher, GAP 2002-031, Paris 2002.
- [2] SUOMIJÄRVI T., Surface Detector Electronics for the Pierre Auger Observatory, GAP 2001-026 for ICRC 2001, Paris 2001.
- [3] BRUNET J-M., CHEIKALI C., COLONGES S., COURTY B., GUGLIELMI L., SYLVIA C., Production Results of 120 Unified Boards, GAP 2003-079, Paris 2003.
- [4] CLARK PDJ., DYE A., Environmental Stress Screening and Burn In Test Procedure for electronic equipment used within the Pierre Auger Observatory, GAP 2002-002, Leeds 2002.
- [5] GENOLINI B., NGUYEN TRUNG T., POUTHAS J., Base Line Stability Of The Surface Detector PMT Base, GAP 2003-051, Paris 2003.
- [6] COLONGES S., Quality Management Plan for the Unified Board Production, Paris 2002.
- [7] COLONGES S., COURTY B., PEPE I., The power supply procurement for the Unified Board of the surface detector for the Pierre Auger Project, GAP non référencé, Paris 2001.
- [8] BRUNET J-M., COLONGES S., COURTY B., GUGLIELMI L., JAEGER J-J., PEPE I., WAISBARD J., TRISTRAM G., The Unified Board, GAP non référencé, Paris 2002.
- [9] SUOMIJÄRVI T., The Pierre Auger Project TDR, Technical design review, Paris 2001.
- [10] BENEY J-L., STASSI P., Compte rendu de la revue interne de développement de la Carte Unifiée, Paris 2001.
- [11] S.COLONGES - The Reliability of the Unified Board, Gap non référencé, Paris 2002.

Publications, thèses et autres documents:

- [12] BERTOU X., L'observatoire Pierre Auger : Vers la détection des Photons et Neutrinos à Ultra haute énergie?, Thèse de physique LPNHE Paris, Paris 2001.
- [13] DELIGNY O., Observatoire Pierre Auger : Analyse des Gerbes Inclinées, Observation de Neutrinos d'Ultra Haute Energie, et Signatures d'une Origine Locale pour les rayons cosmiques chargés, Thèse de physique LPNHE Paris, Paris 2002.
- [14] BERTOU X. for the Pierre Auger Collaboration, Calibration and Monitoring of the Pierre Auger Surface Detectors, The 28th International Cosmic Ray Conference, Tokyo 2003.

- [15] ETCHEGOYEN A. for the Pierre Auger collaboration, The Auger Observatory in Argentina, ICRC (International Cosmic Rays Conference) 2003, Tokyo 2003.
- [16] WATSON A. for the Auger Collaboration (Université Leeds UK), Properties and Performance of the Prototype Instrument for the Pierre Auger Observatory, NIMA 46462 accepted 041203, Leeds 2003.
- [17] BLÜMER J. for the Pierre Auger Collaboration, Status and Perspectives of the Pierre Auger Observatory, ICRC 2003, Tokyo 2003.
- [18] SUOMIJÄRVI T. (IPN Orsay) for the Pierre Auger Collaboration – Processing of the signals from the Surface Detectors of the Pierre Auger Observatory, ICRC 2003, Tokyo 2003.
- [19] SZADKOWSKI Z., Acex Cost Effective First Level Surface Trigger in the Pierre Auger Observatory, Papier NIM en cours d'acceptation en janvier 2004, Paris 2004.
- [20] BRUNET J-M., COLONGES S., COURTY B., GUGLIELMI L., JAEGER J-J., WAISBARD J., TRISTRAM G., The Local Station electronic of the Surface Detector in the Pierre Auger Observatory, Papier NIM à publier, Paris 2004.
- [21] UNION TECHNIQUE DE L'ELECTRICITE ET DE LA COMMUNICATION, Recueil de normes de Fiabilité RDF 2000 - UTE C 80-810 de juillet 2000, Paris 2000.
- [22] Norme militaire Américaine MIL-STD-1629A.
- [23] Recueils militaire Américain d'évaluation de fiabilité MIL HDBK 217F et MIL HDBK 338.
- [24] SOCIETE FIATEQ, Journée de conseil en fiabilité appliqué à l'expérience Auger, Paris 2002.

Internet :

[25] Sites officiels: www.auger.org.ar (Site de l'observatoire) et www.auger.org (USA)

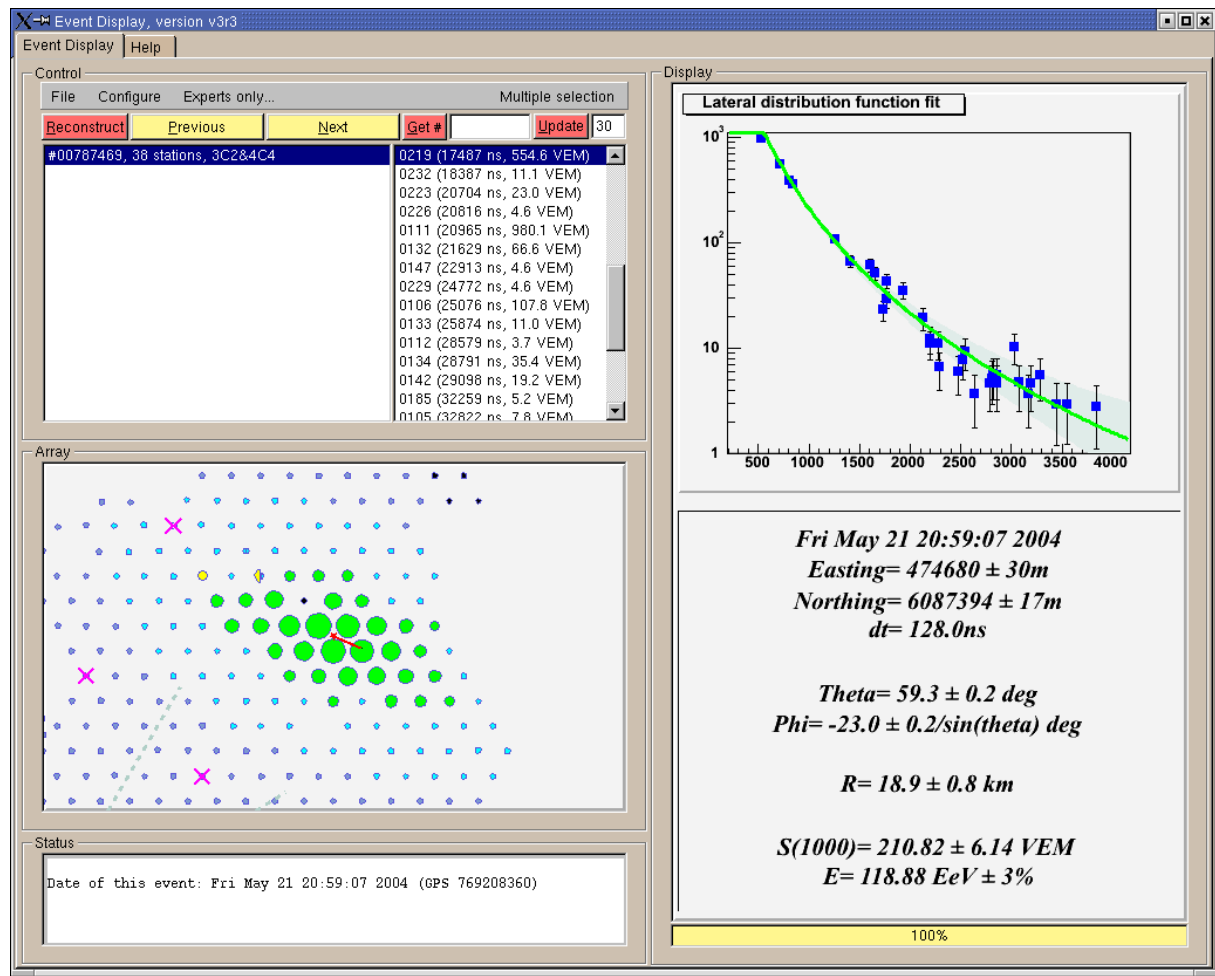
[26] Sites de notre laboratoire: www.cdfpaod.in2p3.fr et <http://cdfinfo.in2p3.fr>

Des documentations diverses sur les retours d'expérience et la fiabilité ont été trouvées sur le réseau Internet.

Les références et les notes écrites par la collaboration Auger sont accessibles via Internet :

www.auger.org.ar/admin/GAP_NOTES

L'èvement de 118.88 EeV !!!



et d'autres à venir...

L'observatoire Pierre Auger vise à observer les événements les plus violents de l'univers afin d'en découvrir les origines. Le premier site de cet observatoire, en cours de construction en Argentine, sera constitué de 1600 détecteurs au sol et de 4 télescopes d'observation de la fluorescence dans l'atmosphère. De par sa taille gigantesque, cet observatoire est le plus grand au monde. La présence d'eau en hiver sur une grande partie de la Pampa, et aussi, la grande surface rend l'accès difficile à la majorité des détecteurs. Les conditions difficiles d'environnement (variations thermiques, air salin et humidité) et la nécessité d'un fonctionnement permanent pendant 20 ans, imposent la recherche constante de la fiabilité à toutes les étapes du projet. Après une description nécessaire de l'ensemble de l'observatoire, ce mémoire décrit l'électronique des détecteurs de surface de l'observatoire Pierre Auger et les étapes de sa conception. La fiabilité constitue un problème prédominant de ce mémoire, en particulier en ce qui concerne :

- La recherche de la fiabilité optimale lors de la conception
- L'évaluation de la fiabilité et la mise en place des stratégies de maintenance
- La gestion de production (mise en place des procédures qualité, choix de l'entreprise, dossier de fabrication...) : de la qualité de production dépend la fiabilité du produit
- Le déverminage qui permet d'éliminer les « défauts de jeunesse »
- La mise au point des équipements de test
- L'étude des performances des détecteurs, sa calibration et les méthodes de sélection des événements. La bonne connaissance du fonctionnement des détecteurs constitue d'une part une approche système intéressante et d'autre part elle permet une identification rapide des défaillances
- L'intégration, le suivi des cartes sur le terrain et la mise en place d'un retour d'expérience. L'expertise acquise peut profiter avantageusement à de futures expériences.

Mots clés:

Calibration - Détecteur de rayons cosmiques - Déverminage - Electronique du détecteur de surface de l'Observatoire Pierre Auger - Fiabilité - Gestion de production - Retour d'expérience - Tropicalisation.

Keywords:

Boards backtrack - Burn-in and stress screening - Calibration - Conformal coating - Cosmic rays detector - Pierre Auger Observatory Surface Detector Electronic- Production management - Reliability.